



M 2015

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO EM MEIO URBANO

LARA SOFIA DA CUNHA OLIVEIRA
DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO EM MEIO URBANO

LARA SOFIA DA CUNHA OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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 Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - 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.

Aos meus Pais e Irmã,
Pelo apoio incondicional.

“Não é o trabalho, mas o saber trabalhar, que é o segredo do êxito no trabalho. Saber trabalhar quer dizer: não fazer um esforço inútil, persistir no esforço até ao fim, e saber reconstruir uma orientação quando se verificou que ela era, ou se tornou, errada”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui uma palavra de agradecimento a todos que direta ou indiretamente tornaram possível a concretização deste trabalho, em particular:

Ao Professor Doutor José Pedro Tavares, orientador desta dissertação, pelos conhecimentos transmitidos e disponibilidade sempre demonstrada.

A todos os professores do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil pelos conhecimentos que me transmitiram ao longo deste percurso como estudante.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam ao longo da minha vida académica e que sempre me apoiaram através da sua amizade, companheirismo e recargas de energia entre dias de trabalho.

Um agradecimento muito especial aos meus pais e irmã, por sempre me terem incentivado e apoiado no decorrer da minha formação humana e académica.

RESUMO

A presente dissertação pretende contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre a importância da análise de dados numa gestão dinâmica de tráfego urbano e procura por uma mobilidade sustentável.

Uma boa gestão do tráfego baseia-se num conhecimento contínuo e metódico das viagens realizadas na infraestrutura rodoviária, e, portanto, é indispensável a recolha, armazenamento, tratamento e análise de dados.

A recolha e armazenamento de dados reais são tarefas que podem ser imputadas aos sistemas centralizados de controlo de tráfego urbano (*Urban Traffic Control Systems*, sistemas UTC). Por outro lado, o tratamento destes dados ainda é uma área que requer bastante atenção e estudo; salienta-se que, no caso prático do presente trabalho, a metodologia de tratamento de dados teve como base trabalhos já realizados, embora também tenha sido necessário definir uma metodologia para o “tratamento” de dados.

O tratamento de dados permite o cálculo, direta ou indiretamente, de medidas e indicadores de desempenho que sejam capazes de avaliar a qualidade de circulação numa rede viária. Para tal, foi imprescindível estudar e procurar identificar os principais indicadores de desempenho relacionados com a fluidez do tráfego e classificá-los segundo parâmetros de avaliação criteriosos. De seguida, selecionou-se alguns dos indicadores encontrados na literatura e determinou-se uma metodologia de cálculo dos mesmos para a sua determinação e posterior análise do desempenho da rede viária em destaque no Caso Prático.

Desta forma, conseguiu-se uma análise comparativa dos diferentes indicadores de desempenho utilizados no caso prático, assim como a avaliação do desempenho dos arcos da malha viária em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Centralizados de Controlo de Tráfego, Dados de tráfego, Medidas de desempenho, Indicadores de desempenho

ABSTRACT

This master's thesis aims to contribute for the improvement of the knowledge on the importance of both analyzing data in a dynamic management of urban traffic and search for a sustainable mobility.

A good management of traffic is based on a continuous and meticulous knowledge of the existing demand in the road infrastructure, and, therefore, the retraction, storage, processing and analysis of the traffic data is indispensable.

The retraction and storage of the data obtained *in situ* are tasks of the centralized urban traffic control systems (UTC systems). In contrast, this data processing is still an area that requires a lot of attention and study; it should be added that, in the practical case of this work, the methodology used to the raw data processing was based on works already done, although it was also necessary to define a data processing methodology.

The data processing enables, either directly or indirectly, the calculation of performance measures and indicators capable of assessing the quality of circulation on a road network. To this end, it was essential to study and try to identify the main performance indicators relating to traffic flow and classify them using insightful valuation parameters. Then, it was selected some of the performance indicators found in literature, and for those who were chosen, it was assigned them a methodology of calculation. After that, it was possible to analyse the performance of the existing links in the road network highlighted in the Practical Case.

In this way, it was reached a comparative analysis of the different performance indicators used in the practical case, as well as the performance evaluation of the links that were under consideration.

KEYWORDS: Centralized urban traffic control systems, Traffic data, Performance Measures, Performance indicators

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. CONTROLO CENTRALIZADO DE TRÁFEGO URBANO	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTES	6
2.3. SISTEMAS CENTRALIZADOS DE CONTROLO DE TRÁFEGO URBANO	8
2.4. TRATAMENTO DE DADOS	11
2.4.1. INTRODUÇÃO	11
2.4.2. SOFTWARE ASTRID	11
2.4.2.1. Conceito de ASTRID e descrição de dados do SCOOT	11
2.4.2.2. Consulta à base de dados modelada pelo SCOOT via <i>software</i> ASTRID	13
2.4.2.3. Limitações do <i>software</i> ASTRID	14
2.4.3. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICAS	15
2.4.3.1. Conceito e elementos constituintes de SIG	15
2.4.3.2. Aplicações dos SIG em Transportes	17
2.4.3.3. Limitações e futuro dos SIG e SIG-T	18
2.4.4. APLICAÇÕES DE DADOS DINÂMICOS DO SISTEMA UTC À GESTÃO DO TRÁFEGO URBANO	19
2.4.4.1. Estrutura de utilização de dados de sistemas UTC	19
2.4.4.2. Medidas de desempenho do tráfego derivadas de dados de sistemas UTC	20
3. INDICADORES CARACTERIZADORES DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO EM MEIO URBANO	23
3.1. INTRODUÇÃO	23

3.2. CONCEITO E DESENVOLVIMENTO DE MEDIDAS E INDICADORES DE DESEMPENHO	24
3.3. MEDIDAS DE DESEMPENHO E RESPETIVOS INDICADORES CARACTERIZADORES	27
3.3.1. NÍVEIS DE SERVIÇO DERIVADOS DO HCM E RÁCIO VOLUME/CAPACIDADE	27
3.3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO COMPOSTOS	30
3.3.2.1. Indicador de Congestionamento.....	30
3.3.2.2. Indicador de Robustez da Rede	32
3.3.2.3. Indicador de Robustez da Rede modificado	33
3.3.2.4. Indicador de Robustez de Viagens na Rede	34
3.3.2.5. Indicador de Importância	34
3.3.2.6. Indicador de Exposição	36
3.3.2.7. Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento	37
3.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS INDICADORES DE DESEMPENHO	38
3.4.1. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO	38
3.4.2. AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO E RESPETIVOS INDICADORES	40
3.4.2.1. Nível de Serviço e rácio Volume/Capacidade	40
3.4.2.2. Indicador de Congestionamento.....	41
3.4.2.3. Indicador de Robustez da Rede	41
3.4.2.4. Indicador de Robustez da Rede modificado	41
3.4.2.5. Indicador de Robustez de Viagens na Rede.....	42
3.4.2.6. Indicador de Importância	42
3.4.2.7. Indicador de Exposição	42
3.4.2.8. Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento	43
3.4.2.9. Síntese.....	43
4. CASO PRÁTICO	45
4.1. DESCRIÇÃO E OBJETIVOS	45
4.2. METODOLOGIA ABORDADA	46
4.2.1. TRATAMENTO DE DADOS	46
4.2.2. CÁLCULO DE INDICADORES ATRAVÉS DO MODELO SATURN	49
4.2.3. SELEÇÃO E PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO A UTILIZAR	55
4.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	56
4.3.1. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO NÍVEL DE SERVIÇO	58
4.3.2. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO RÁCIO DÉBITO/CAPACIDADE	59

4.3.3. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO INDICADOR DE CONGESTIONAMENTO.....	60
4.3.4. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO INDICADOR DE CUSTO MARGINAL SOB CONGESTIONAMENTO.....	60
4.4. CONCLUSÕES DO CASO PRÁTICO.....	62
5. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....	67
5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	67
5.2. TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS	77
TRATAMENTO DE DADOS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistemas Inteligentes de Transporte (Figueiredo 2005).....	6
Figura 2.2 – Interface do <i>software</i> ASTRID para a consulta à base de dados do sistema SCOOT (Adaptado de Meneses, Carvalho e Loureiro 2003)	13
Figura 2.3 – Elementos constituintes de um SIG (Dantas, Taco e Yamashita 1996).....	16
Figura 2.4 – Simbiose entre SIG e ITS originando SIG-T.....	18
Figura 2.5 – Gestão integrada de transportes (Adaptado de APAS 1996, citado em Tavares 2003) ...	19
Figura 2.6 – Componentes de um sistema de tráfego (Adaptado de Dahlgren, Turner e Garcia 2002)	21
Figura 4.1 – Rede da Cidade do Porto com zonas em análise delimitadas	46
Figura 4.2 – Perfil Temporal dos dias úteis Volume vs. Contador 2 da zona 9 – Antes do tratamento de dados.....	49
Figura 4.3 – Perfil Temporal dos dias úteis Volume vs. Contador 2 da zona 9 – Depois do tratamento de dados.....	49
Figura 4.4 – Zona a analisar e contadores existentes na área	50
Figura 4.5 – Rede rodoviária modelada da zona da Constituição	51
Figura 4.6 – Perfil temporal Capacidade/Procura vs. Tipo de regulação (SVC 2014)	54

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Diferentes aplicações de sistemas ITS (Adaptado de Miles e Chen 2004).....	7
Quadro 2.2 – Principais diferenças entre os sistemas UTC (Adaptado de Papageorgiou 2007).....	10
Quadro 2.3 – Variáveis modeladas pelo SCOOT e disponibilizadas pelo ASTRID por SCN (Adaptado de Meneses, Carvalho e Loureiro 2003).....	15
Quadro 2.4 – Tipo de dados de um sistema UTC vs. Tipo de utilizador (Adaptado de Dahlgren, Turner e Garcia 2002).....	20
Quadro 3.1 – Impactos a considerar na mobilidade sustentável (Adaptado de Litman 2007)	25
Quadro 3.2 – Nível de serviço de interseções não semaforizadas (SVC 2014).....	29
Quadro 3.3 – Nível de serviço de interseções semaforizadas (SVC 2014).....	29
Quadro 3.4 – Comparação entre os indicadores estudados e os atributos considerados (Adaptado de Oliveira 2012)	44
Quadro 4.1 – Ciclos correspondentes a todas as interseções semaforizadas	52
Quadro 4.2 – Descrição dos dados de interesse retirados do modelo SATURN	54
Quadro 4.3 – Comparação entre os indicadores a utilizar na análise do caso prático e os atributos considerados (Adaptado de Oliveira 2012).....	55
Quadro 4.4 – Volume e Débito vs. Contador (8h:9h).....	57
Quadro 4.5 – Volume e Débito vs. Contador (12h:13h).....	57
Quadro 4.6 – Indicador de desempenho atraso, d, e medida de desempenho Nível de Serviço (8h:9h)	58
Quadro 4.7 – Indicador de desempenho atraso, d, e medida de desempenho Nível de Serviço (12h:13h)	58
Quadro 4.8 – Hierarquização dos arcos segundo Nível de Serviço (8h:9h).....	59
Quadro 4.9 – Hierarquização dos arcos segundo Nível de Serviço (12h:13h).....	59
Quadro 4.10 – Hierarquização dos arcos segundo q/C (8h:9h)	59
Quadro 4.11 – Hierarquização dos arcos segundo q/C (12h:13h)	59
Quadro 4.12 – Hierarquização dos arcos segundo CI (8h:9h)	60
Quadro 4.13 – Hierarquização dos arcos segundo CI (12h:13h)	60
Quadro 4.14 – Débitos e velocidades em regime de congestionamento antes (0) e depois (1) da multiplicação pelo fator 1,01.....	61
Quadro 4.15 – Hierarquização dos arcos segundo ICMC (8h:9h).....	62
Quadro 4.16 – Hierarquização dos arcos segundo ICMC (12h:13h).....	62
Quadro 4.17 – Classificação dos indicadores de desempenho quanto aos seus atributos	63
Quadro 4.18 – Hierarquização dos arcos (8h:9h)	64

Quadro 4.19 – Hierarquização dos arcos (12h:13h)	64
Quadro 4.20 – Hierarquização dos arcos tendo em consideração os indicadores de desempenho ponderados pelos seus atributos.....	64

SÍMBOLOS

A – Conjunto de todos os arcos da rede

A^{nd} – Conjunto de todos os arcos que não provocam a desconexão da rede

C – Duração do ciclo [seg]

C – Capacidade do arco [uvl/h]

c – Custo das viagens em todo o sistema, com todos os arcos em funcionamento [uvl]

c_a – Custo das viagens em todo o sistema, após a remoção do arco a [uvl]

CI – Indicador de congestionamento [adimensional]

$C_{m,x}$ – Capacidade real do movimento não prioritário x [uvl/h]

ct_a – Valor médio do tempo consumido no arco a [€/h]

d – Atraso médio [seg]

D_n – Número total de viagens na rede, ou procura total [uvl/h]

fl_{a0} e fl_{a1} – Débito*distância inicial e final, respetivamente, no arco a [uvl/h*km]

g – Tempo de verde útil [seg]

$ICMC_a$ – Custo marginal de congestionamento por unidade de distância num arco a [€/km]

$IE(m)$ – Indicador de exposição da região m a um acontecimento aleatório [seg]

II_a – Indicador de importância do arco a [seg]

$II^{ins}(a)$ – Indicador de importância do arco a , em caso de procura insatisfeita [adimensional]

l – Comprimento do arco [m]

L^{nd} – Número de arcos que não provocam a desconexão da rede

N_m^d – Conjunto de nós pertencentes à região m

NRI_a – Indicador de robustez da rede para o arco a [uvl]

$NRI-m_a$ – Indicador de robustez de rede modificado do arco i [uvl]

NTR – Indicador de robustez de viagens em rede [seg]

q – Débito de chegadas [uvl/h]

q/C – Rácio débito/Capacidade [%]

r – Redução do atraso (proporção) devido a medidas operacionais eventualmente impostas [%]

s_c – Velocidade de percurso em regime de congestionamento [km/h]

s_f – Velocidade de percurso em regime livre [km/h]

s_{a0} – Velocidade inicial no arco a , antes do aumento no produto débito*distância [km/h]

s_{a1} – Velocidade final no arco a , depois do aumento no produto débito*distância [km/h]

t – Tempo t

T – Período de análise

\bar{t} – Média dos 3 tempos anteriores ao do valor do “outlier”

t_c – Tempo de percurso no arco em regime de congestionamento [seg]

t_d – Atraso provocado pelo congestionamento [seg]

t_f – Tempo de percurso no arco em regime livre [seg]

t_i – Atraso devido a incidentes [seg]

t_{ij} – Tempo da viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com o arco a interrompido (a) [seg]

$t_{ij}^{(0)}$ – Tempo de viagem entre i e j com toda a rede íntegra [seg]

$t_{ij}^{(a)}$ – Tempo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do arco a [seg]

t_r – Atraso recorrente [seg]

V – Volume de tráfego no arco [uvl/h]

\bar{v} – Média dos 3 dados anteriores ao do valor do “outlier” [veic/h]

$vn_{ij}^{(a)}$ – Total de viagens entre i e j não realizadas devido à interrupção do arco a [uvl/h]

vt_{ij} – Procura de viagens entre i e j [uvl/h]

v_x – Débito horário de chegada do movimento não prioritário x [uvl/h]

v_d – Valor do “outlier” a corrigir correspondente ao tempo t [veic/15min]

$v_d(t - 1)$ – Valor correspondente ao dia de v_d para o tempo t-1 [veic/15min]

$v_{rd}(t)$ – Valor médio dos restantes dias homólogos ao do “outlier” para o tempo t [veic/15min]

$v_{rd}(t - 1)$ – Valor homólogo ao $v_{rd}(t)$, incluindo o dia correspondente ao “outlier” [veic/15min]

w_{ij} – Fator de peso que reflete a importância do par origem-destino (OD) ij em relação a outros pares OD

w_o – Coeficiente de regressão

w_1 – Coeficiente de regressão

x – Grau de saturação [adimensional]

x_i – Volume de tráfego correspondente ao tempo t [veic/15min]

\bar{x} – Volume de tráfego médio correspondente ao tempo t, para os dias homólogos [veic/15min]

α – Coeficiente de calibração

β – Coeficiente de calibração

θ – Fator associado a incidentes, indicando a probabilidade de ocorrência de incidentes na rede de transportes

δ_i – Variável binária

$\Delta t_{ij}^{(a)}$ – Variação no tempo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do arco a [seg]

ACRÓNIMOS

ASTRID - *Automatic SCOOT Traffic Information Database*

ATMS - *Advanced Traffic Management Systems*, Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego

BPR – *Bureau of Public Roads*

CI – *Congestion Index*, Indicador de Congestionamento

DNRR - *Depletion of Non-Renewable Resources*, Esgotamento de Recursos Não Renováveis

GEH – Parâmetro empírico Geoffrey E. Havers

HCM - *Highway Capacity Manual*

ICMC – Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento

IE – Indicador de Exposição

II – Indicador de Importância

ITS – *Intelligent Transport Systems*, Sistemas Inteligentes de Transportes

LPU – *Link Profile Units*

MOTION – *Method for the Optimisation of Traffic Signals in Online-Controlled Networks*

NCHRP 365 – *National Cooperative Highway Research Program*. Relatório nº 365

NRI – *Network Robustness Index*, Indicador de Robustez da Rede

NRI-m – *Modified Network Robustness Index*, Indicador de Robustez da Rede modificado

NS – Nível de Serviço

NTR – *Network Trip Robustness*, Indicador de Robustez de Viagens na Rede

OD – Par origem-destino

OPAC – *Optimisation Policies for Adaptive Control*

PRODYN – *Profile Dynamic autoregulation*

q/C – Rácio Débito/Capacidade

UTC – *Urban Traffic Control*, Controlo de Tráfego Urbano

UTOPIA – *Urban Traffic Optimisation Integrated Automation*

UTMS – *Universal Traffic Management Society*

SATURN - *Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Network*

SCATS – *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*

SCOOT – *Split Cycle Time and Offset Optimization Technique*

SCN - *SCOOT Control Number*

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SIG-T – Sistemas de Informações Geográficas para Transportes

TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação

TransCAD – *Transportation Planning Software*

TRANSYT - *Traffic Network Study Tool*

TRL – *Transport Research Laboratory*

V/C – Rácio Volume/Capacidade

ABREVIATURAS

Cont. – Contador

1

Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO

A procura existente nas infraestruturas rodoviárias pode ser considerada como uma procura derivada, uma vez que está relacionada à satisfação das necessidades como trabalho, estudos, lazer, saúde, entre outros. Consequentemente, a mobilidade é uma necessidade quotidiana, e essencial na dinâmica das cidades, por estar ligada à execução de ações que localizam-se com frequência em diferentes espaços geográficos.

Para que haja mobilidade plena, o direito à acessibilidade deve ser garantido. No contexto urbanístico, a acessibilidade apresenta-se como a facilidade, tendo em conta os fatores distância, tempo e custo, em alcançar-se com autonomia o destino desejado.

Todavia, a estratégia predominante nas construções de infraestruturas favorece novas e extensas vias e um espalhamento do tecido urbano, o que provoca o distanciamento de partes da cidade e favorece o uso do meio de transporte motorizado individual, o que tem ocasionado os principais problemas de mobilidade urbana.

Ou seja, inicialmente, este tipo de transporte pretendia atenuar os problemas de mobilidade a longo prazo; porém, o crescimento do seu número de utilizadores superou inclusive os avanços na tecnologia e o aumento da capacidade das infraestruturas existentes, de forma que acabou por agravar o quadro inicial do problema. Como consequência, outros aspetos da cidade acabaram por ser afetados, podendo-se citar a saturação da capacidade viária urbana (congestionamento), os altos níveis de emissão de substâncias e ruídos poluentes, o aumento dos acidentes, com feridos e até mortes a estes associados, a desigualdade social, o alto nível de ocupação do solo, e a grande necessidade de investimentos públicos, entre outros.

Como resposta a tais problemas de abrangência ambiental, social e económica, conceitos de desenvolvimento sustentável têm sido discutidos entre técnicos e população em geral.

No contexto citadino, a procura pelo desenvolvimento sustentável tem provocado alterações na forma de compreender e planejar o meio urbano, pelo que nas discussões referentes a este tema, as quais envolvem planeadores, administradores públicos, comunidade académica e população em geral, alguns aspetos têm merecido destaque, tais como:

- a. A preocupação com os atuais padrões de desenvolvimento das cidades, marcados pelo crescimento desordenado e espalhamento do tecido urbano;
- b. A degradação ambiental evidenciada pela poluição, incluindo a sonora, e carência de áreas verdes;

- c. A desigualdade social e o isolamento espacial, que contribuem para a diminuição de acessos às oportunidades e atividades urbanas;
- d. As dificuldades impostas à circulação de pessoas e bens, causadas pela falta de integração entre o planeamento urbano e de transportes e o incentivo aos meios de transporte individuais em detrimento dos coletivos, além do declínio da qualidade ambiental das cidades em função dos seus sistemas de mobilidade.

Assim sendo, as preocupações relacionadas aos transportes e à mobilidade são de especial interesse para o desenvolvimento urbano sustentável, uma vez que os atuais padrões de mobilidade têm contribuído para inúmeras deseconomias para as cidades, além de afetarem de forma direta a qualidade de vida dos seus cidadãos. De facto, as questões de mobilidade costumavam ser tratadas apenas como uma questão de acesso físico aos meios de transporte, o que pode estar na origem de muitos dos problemas urbanos detetados hoje em dia. Porém, a forma de planear as cidades e seus sistemas de circulação tem sido revista, resultando em novas estratégias de atuação e na construção de um novo paradigma para a mobilidade urbana.

Esse novo paradigma reconhece que os problemas de mobilidade não se limitam apenas ao acesso a esses meios de transporte; estes problemas envolvem igualmente questões económicas, sociais, aspetos ligados ao planeamento físico das cidades, além de preocupações com o financiamento e a gestão contínua da mobilidade.

Por conseguinte, o novo paradigma em desenvolvimento volta-se para a melhoria das condições de mobilidade e acessibilidade da população, procurando, em última análise, uma melhoria da qualidade de vida e a construção e manutenção do que se denomina de mobilidade urbana sustentável.

Nesta ordem de ideias, tornou-se fundamental adotar estratégias inovadoras, que originaram o conceito de Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transport Systems, ITS*), cujo objetivo principal é proporcionar novas formas perceptíveis de criar uma mobilidade sustentável.

De uma forma simplificada pode afirmar-se que os ITS utilizam tecnologias de informação, comunicação e controlo para melhorar o desempenho e a eficácia das operações da rede viária e, além disso, atravessam áreas como, os transportes, a engenharia e as telecomunicações. Esta natureza multidisciplinar contribui para a complexidade do problema, pois requer a cooperação e transferência de conhecimento entre as várias áreas de investigação. Assim, a comunidade científica tem sentido uma forte motivação para dedicar-se ao estudo, investigação e desenvolvimento desta área.

Mais concretamente, os ITS têm sido alvo de uma investigação mais pormenorizada no sentido de desenvolver sistemas de gestão e informação de tráfego, e de criar estratégias operacionais adequadas para lidar com os problemas que resultam de situações de congestionamento, e suas consequências. Algumas aplicações destes sistemas, tais como o controlo dinâmico de tráfego, têm vindo a ganhar cada vez mais importância como ferramentas eficientes para a gestão de tráfego, sendo que envolvem a disseminação de informação, a partir de um centro de gestão e controlo de tráfego.

No entanto, devido à complexidade dos problemas associados ao congestionamento e efeitos associados, acresce a exigência no desenvolvimento de ferramentas adequadas que permitam a total compreensão destes fenómenos, bem como as suas inter-relações.

Neste sentido, os indicadores de desempenho surgem como excelentes ferramentas para diagnóstico das condições de mobilidade, sendo que, para cumprir o seu objetivo, fazem uso das informações recolhidas e armazenadas pelos Sistemas Inteligentes de Transportes.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

De um modo geral, o trabalho que aqui se apresenta pretende contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre tratamento de dados de tráfego e indicadores de desempenho que permitam caracterizar as condições de circulação de um meio urbano.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- a. Reconhecimento da importância dos Sistemas Inteligentes de Transporte, mais precisamente dos Sistemas de Controlo de Tráfego Urbano, na gestão dinâmica de tráfego urbano;
- b. Identificação de métodos de tratamento de dados de tráfego recolhidos em campo;
- c. Identificação e comparação de indicadores de desempenho adotados na hierarquização de segmentos da rede rodoviária, com destaque na fluidez do tráfego e no desempenho da rede rodoviária;
- d. Estudo de um caso prático na cidade do Porto com o propósito de exemplificar e analisar os resultados obtidos.

Para atingir os objetivos deste trabalho, desenvolveram-se os seguintes passos:

- a. Pesquisa bibliográfica e sintetização da mesma de forma a apresentar-se a informação teórica mais relevante para a compreensão do tema;
- b. Apresentação dos conceitos de medidas de desempenho e indicadores de desempenho;
- c. Indicação e caracterização de indicadores de desempenho considerados mais pertinentes para o caso em estudo;
- d. Exposição de parâmetros de avaliação dos indicadores de desempenho encontrados na literatura;
- e. Avaliação dos indicadores de desempenho tendo por base parâmetros de avaliação;
- f. Apresentação do caso prático a ser analisado, cujos dados foram disponibilizados pela Câmara Municipal do Porto;
- g. Metodologia de tratamento de dados brutos através do programa Excel;
- h. Metodologia de recolha de dados adicionais a partir do programa de modelação SATURN;
- i. Cálculo de indicadores de desempenho de uma rede viária pertencente ao caso prático;
- j. Avaliação do desempenho global da rede viária em análise.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste subcapítulo descreve-se a organização do presente trabalho que se encontra dividido em cinco capítulos, tendo em vista a concretização dos objetivos propostos.

O primeiro capítulo, no qual este tópico se insere, pretende enquadrar o tema da dissertação e definir os objetivos da mesma.

No segundo capítulo, “Controlo Centralizado de Tráfego Urbano”, é apresentada uma revisão bibliográfica que serve como base para a compreensão e elaboração deste trabalho. Assim, faz-se inicialmente uma apresentação aos Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS), dando-se ênfase às suas aplicações e vantagens inerentes para os utilizadores de uma rede de transportes. De seguida, caracteriza-se os Sistemas Centralizados de Controlo de Tráfego Urbano (Sistemas UTC), inseridos nos ITS, sendo que se refere quais os sistemas UTC com mais prestígio no mercado atual, além de ainda contextualizar-se a importância de sistemas de processamento de tratamento de dados recolhidos pelos sistemas UTC. Por fim, ainda faz-se referência aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e suas aplicações na gestão dinâmica de uma infraestrutura rodoviária.

O terceiro capítulo, “Indicadores Caracterizadores das Condições de Circulação em Meio Urbano”, inicia-se com a contextualização de medidas e indicadores de desempenho. Posteriormente, são apresentados indicadores de desempenho que possam caracterizar a qualidade de circulação em meio urbano. Por último, realiza-se uma comparação qualitativa dos indicadores de desempenho apresentados segundo parâmetros considerados pertinentes de avaliação.

No capítulo quatro, “Caso Prático”, apresenta-se o caso de estudo no qual põe-se em prática o aprendido e recolhido com a presente dissertação até ao início deste capítulo. De seguida, é exposta a metodologia aplicada para o tratamento dos dados brutos disponibilizados pela Câmara Municipal do Porto e para a recolha de dados adicionais que possam ser úteis na determinação de indicadores de desempenho e consequente análise da rede viária previamente escolhida. Posteriormente, seleciona-se entre todos os indicadores de desempenho referidos no capítulo anterior, quais os que devem ser determinados no presente caso prático, e qual a metodologia de cálculo a ser aplicada para cada um. Depois de apresentados e discutidos os resultados obtidos, este capítulo é concluído com uma avaliação ao estudo e resultados obtidos para o caso prático.

Finalmente, no capítulo “Conclusões e Perspetivas Futuras”, enunciam-se as principais conclusões obtidas na elaboração desta dissertação, assim como recomendações para futuros trabalhos de investigação relacionados com o tema deste trabalho.

2

Controlo Centralizado de Tráfego Urbano

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo expõe uma visão geral sobre o controlo centralizado de tráfego urbano, de modo que se possa compreender o contexto em que está envolvido o objeto de estudo do presente trabalho, isto é, análise de dados de um sistema centralizado de controlo de tráfego; estes sistemas, usualmente definidos como sistemas UTC (*Urban Traffic Control*), inserem-se nos Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems, ITS*) que, por sua vez, tratam-se de uma aplicação integrada de tecnologias de comunicação, controlo e processamento de informação para o sistema de transporte.

Atualmente existem diferentes tipos de sistemas UTC aplicados à gestão urbana, tais como SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) e SCOOT (*Split Cycle Time and Offset Optimization Technique*), sendo que cada sistema apresenta estratégias de operação distintas.

Adicionalmente, estes sistemas têm um grande potencial, não muito explorado, no que se refere aos dados de tráfego que recolhem, no sentido em que podem dar uma imagem em tempo real do estado da circulação numa rede urbana, bem como a possibilidade de fornecerem dados para uma análise *a posteriori*.

Evidentemente que para tal é necessário que exista o processamento de tratamento de dados, dando como exemplo o *software* ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*), utilizado como programa de importação de dados no sistema SCOOT.

Uma alternativa para otimizar a consulta, o processamento e a utilização de dados de sistemas UTC consiste em viabilizar uma interface entre o sistema responsável pela modelação da base de dados do sistema UTC e um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Com esta ligação, é possível atribuir carácter espacial ao processo de consulta e utilização da base de dados dinâmica de sistemas UTC.

A atribuição do carácter espacial a dados de sistemas UTC viabiliza análises sistemáticas sobre o comportamento do tráfego urbano. Por sua vez, os resultados destas análises podem auxiliar:

- a. Utilizadores das vias na escolha da rota de viagem, via internet;
- b. Técnicos responsáveis pela gestão do tráfego na definição de estratégias de controlo semafórico;
- c. Gestores públicos na distribuição de investimentos públicos no sistema de tráfego e transporte urbano.

Desta forma, o acesso, a modelação e o tratamento de dados de sistemas UTC são capazes de produzir e fornecer informações sobre as condições do tráfego urbano a diferentes tipos de utilizadores, podendo auxiliar no incremento do rendimento das deslocações urbanas.

2.2. SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

Devido ao crescimento dos níveis de tráfego e consequente nível de congestionamento nas grandes cidades em todo o mundo e à carência de recursos para a construção de novas infraestruturas, as autoridades gestoras municipais têm optado pelo aumento de eficiência e capacidade das já existentes por meio da aplicação de novas tecnologias. Neste contexto, é possível salientar os Sistemas Inteligentes de Transporte, sistemas ITS (*Intelligent Transport Systems*), como uma ferramenta para o aumento da eficiência da rede viária urbana, proporcionando a redução do congestionamento e o aumento da segurança e conforto (Nowacki 2012), permitindo manter ou atingir os níveis de serviço desejados.

Desta forma, os sistemas ITS permitem definir um conjunto de tecnologias aplicadas à gestão de sistemas de transportes para melhorar, tanto a segurança, como a eficiência rodoviária, utilizando tecnologias de informação, de telecomunicações e de controlo automático (Figura 2.1).

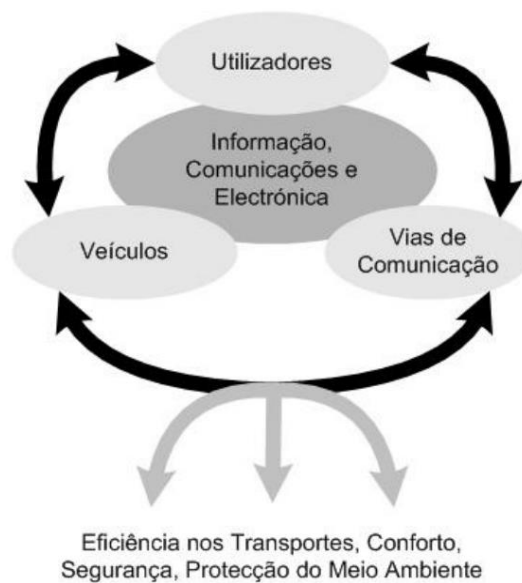


Figura 2.1 – Sistemas Inteligentes de Transporte (Figueiredo 2005)

O quadro 2.1 apresenta as diferentes áreas de aplicação de sistemas ITS, bem como os respetivos serviços prestados aos utilizadores de uma rede de transportes.

Quadro 2.1 – Diferentes aplicações de sistemas ITS (Adaptado de Miles e Chen 2004)

Categorias	Aplicações
Gestão de tráfego	Apoio ao planeamento de transportes
	Controlo de tráfego
	Gestão da procura
	Gestão da manutenção de infraestruturas
	Gestão de incidentes
	Política de regulamentos de trânsito
Gestão de emergências	Gestão de veículos de emergência
	Notificação de emergências e segurança pessoal
	Notificação de incidentes perigosos
Informação para viajantes	Informação antes da viagem
	Informação durante a viagem
	Planeamento de rotas e apoio à navegação
	Serviços de informação
Operação de veículos comerciais	Gestão de frotas
	Inspeção automática da segurança da infraestrutura
	Monitorização da segurança no interior dos veículos
Pagamento eletrónico	Transações financeiras eletrónicas
Segurança	Aumento da segurança para utilizadores idosos ou com deficiência
	Interseções inteligentes
	Segurança das viagens no Transporte Público
Sistemas avançados de controlo de veículos	Difusão de restrições pré-colisão
	Disponibilização de segurança
	Impedimento de colisão longitudinal
	Melhoramento da visão
	Operação de veículos automáticos
Transportes públicos	Gestão da procura dinâmica de transportes
	Gestão de transportes públicos
	Gestão partilhada de transportes

Segundo Taniguchi et al. (2001), todas as aplicações de sistemas ITS usam os seguintes elementos básicos na realização das suas atividades: aquisição, processamento e tratamento de dados. A aquisição de dados é realizada por equipamentos de recolha de dados de tráfego instalados na infraestrutura rodoviária. Os dados recolhidos são enviados às centrais de controlo através de uma rede de transmissão de dados, para depois serem processados por programas computacionais específicos de gestão de tráfego, como o SCOOT e SCATS, de forma a obter-se um conjunto de informações úteis para a gestão de sistemas de transporte.

As aplicações do sistema ITS, apesar de onerosas, conferem inúmeros benefícios para a gestão de tráfego urbano, tais como:

- a. Melhoria da qualidade do ar, por meio da gestão da frota e monitorização da poluição do ar (Martens 2013; Taniguchi e Thompson 2014);
- b. Planeamento de transportes, recorrendo à recolha e modelação adequada de dados históricos do tráfego compilados pelo sistema ITS (Martens 2013; TRB 2002);
- c. Integração entre sistemas de transporte através do intercâmbio de informações entre as agências gestoras, de forma a melhorar a acessibilidade para os diferentes utilizadores (Penning e Bell 2012);
- d. Aumento da segurança viária, por meio de sistemas dedicados ao controlo de cargas perigosas e, ainda, priorização de veículos de emergência (Puentes 2000; Taniguchi e Thompson 2014);
- e. Aumento da capacidade viária e redução de custos associados a deslocações, permitidos pela otimização semaforica (Taniguchi et al. 2001).

2.3. SISTEMAS CENTRALIZADOS DE CONTROLO DE TRÁFEGO URBANO

Inserido nos sistemas que compõem os sistemas ITS, denominada *Advanced Traffic Management Systems* (ATMS), os sistemas centralizados de controlo de tráfego urbano (*Urban Traffic Control*, UTC) representam uma importante ferramenta na gestão do tráfego urbano.

Os sistemas UTC consistem num conjunto de tecnologias empregues para aumentar a eficácia das redes urbanas de tráfego, de forma a promover a monitorização e a otimização da circulação viária, viabilizando a mitigação do congestionamento urbano, através do incremento da capacidade viária, da diminuição do atraso e do tempo de viagem dos utilizadores da rede viária urbana (Meneses, Leandro e Loureiro 2003).

As cidades são diferentes entre si e, como tal, podem ter diferentes requisitos devido a políticas internas; por exemplo, a existência de políticas ambientais em muitos países obrigam ao incentivo do uso de transporte público e bicicletas e ao desencorajamento do uso de veículos individuais motorizados, enquanto, em outros países, tal política já não é prioritária.

Assim sendo, a escolha do sistema UTC utilizado reflete as exigências e necessidades de cada autoridade local. Segundo Hounsell e McDonald (2001), as considerações que refletem questões políticas e tecnológicas predominantes na escolha do sistema UTC a utilizar podem ser:

- a. Normas ou preferências/prioridades nacionais;
- b. Experiência ou suporte disponível para o sistema;
- c. Demonstrações comprovativas da sua eficácia em diferentes situações operacionais;
- d. Custos de implementação, operação e manutenção;
- e. Características do tráfego (composição do tráfego, crescimento, variação, nível de congestionamento);
- f. Questões relacionadas com os sistemas dependentes de deteção (custos de manutenção);

g. Perspetivas para desenvolvimento futuro.

Segundo Sousa et al. (2000), o controlo centralizado do tráfego urbano pode adotar duas estratégias: operação em tempo fixo e operação em tempo real. Cada estratégia apresenta as suas vantagens e desvantagens que permitem escolher qual a melhor opção para cada situação.

Os sistemas centralizados de tempo fixo consistem na utilização de planos de controlo determinados previamente, com base em dados históricos do tráfego. A escolha do plano a ser usado é feita por programação horária, ou com base em dados de volume do tráfego recolhidos por sensores *in situ*. Os planos de tempo fixo apresentam a desvantagem de requererem constante recolha de dados de tráfego para atender às respetivas variações (Loureiro, Gomes e Leandro 2002).

Os planos de tempo fixo podem ser determinados por meio do *software* TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*). Este *software* determina planos ótimos, variando desfasamentos (*offset*) e tempos de verde de um plano inicial, procurando minimizar uma medida de custo que reflita as paragens e os atrasos dos veículos numa rede semaforizada (Wong et al. 2002). Todavia, este tipo de estratégia não apresenta capacidade de resposta para acontecimentos inesperados, tais como acidentes e obras rodoviárias. Estes planos têm um tempo de vida curto, particularmente se o crescimento de tráfego for rápido; como tal, os seus benefícios podem já não ser válidos passados 3 a 4 anos se não houver uma atualização do sistema, atualização essa que pode ser bastante dispendiosa (Papageorgiou et al. 2007).

Na segunda estratégia, operação em tempo real, a programação semaforica é determinada dinamicamente por sistemas dedicados, com base em dados do tráfego recolhidos por tecnologias de deteção em campo (Hamilton et al. 2012). Papageorgiou et al. (2007) referem os seguintes sistemas destinados à otimização semaforica: SCATS (Austrália), SCOOT (Inglaterra), UTOPIA (Itália), UTMS (Japão), PROLYN (França), OPAC (EUA) e MOTION (Alemanha). Dentro destes, é possível destacar os dois primeiros.

SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) é um sistema de gestão em tempo real de tráfego urbano adaptado que sincroniza sinais luminosos de forma a otimizar a fluidez do tráfego; neste sistema, a determinação do ciclo, dos desfasamentos e das repartições “ótimas” do verde é realizada por controladores locais com autonomia para efetuarem as modificações necessárias em cada interseção; todavia, ao conjunto dos controladores locais está associado um computador central, responsável pela definição de uma estratégia de controlo semaforico. Estes fatores fazem com que haja inúmeras vantagens na utilização do sistema SCATS, tais como, redução da poluição do ar, redução do consumo de combustível, redução dos atrasos nas viagens e melhoramento na rede de transporte pública (SCATS 2013).

SCOOT (*Split Cycle Time and Offset Optimization Technique*) coordena a operação em todas as interseções semaforizadas numa área de forma a responder continua e inteligentemente às mudanças de volume de tráfego ao longo do dia e, por isso, trata-se de um controlo semaforico em tempo real, exigindo a troca contínua de dados entre os controladores locais e o computador central. Para além disso, é capaz de remover a dependência que sistemas menos sofisticados têm em relação a planos de sinais, e às desvantagens a estes associados (SCOOT 2014).

De seguida é apresentada um quadro que sumariza as principais diferenças entre os diferentes sistemas UTC.

Quadro 2.2 – Principais diferenças entre os sistemas UTC (Adaptado de Papageorgiou et al. 2007)

Sistema UTC	Vantagens	Desvantagens
Tempo Fixo	<p>Instalação e manutenção de custo mais económico</p> <p>Possibilidade de implementação com equipamento de controlo não centralizado</p> <p>“Ondas” verdes mais fáceis de implementar</p>	<p>Grande quantidade de dados para recolher e atualizar</p> <p>Planos de sinais necessitam de atualizações</p> <p>Perturbações aquando da mudança de planos de sinais</p> <p>Operador manual para resposta a incidentes</p> <p>Impossível lidar com flutuações a curto prazo</p>
Seleção de plano em tempo real (ex: SCATS, MOVA)	<p>Capaz de lidar com algumas flutuações no dia-a-dia</p> <p>Pode beneficiar mais vias principais</p> <p>Mais baratos que os sistemas em tempo real</p>	<p>Exige mais dados que o sistema a tempo fixo</p> <p>Deteção com falhas pode causar problemas</p> <p>Discussões necessárias aquando da mudança de plano de sinais</p> <p>Plano pode mudar por motivo errado se automatizado</p>
Tempo real (ex: SCOOT, UTOPIA)	<p>Menos dados necessários do que nos anteriores</p> <p>Plano evolui com o tempo, logo não são necessárias atualizações</p> <p>Capaz de lidar com flutuações a curto e longo prazo (melhores a longo prazo)</p> <p>Reação imediata a incidentes</p> <p>Informações do tráfego em tempo real disponíveis</p>	<p>Deteção com falhas pode causar perda significativa de eficiência</p> <p>Instalação mais cara (mas manutenção semelhante)</p> <p>Requer algum controlo central</p> <p>Manutenção extremamente importante</p>

Por último, será de referir que estes sistemas acumulam uma grande quantidade de informação de dados de tráfego. Neste âmbito, destaca-se o *software* ASTRID (*Automatic SCOOT Traffic Information Database*) como um sistema de base de dados que tem sido desenvolvido de forma a usar a informação recolhida por este sistema com o intuito de fornecer contexto histórico de condições de tráfego (SCOOT 2014).

2.4. TRATAMENTO DE DADOS

2.4.1. INTRODUÇÃO

O dinamismo das atividades humanas influencia diretamente a variabilidade temporal e espacial dos volumes de tráfego nas redes viárias, pelo que o seu conhecimento apresenta um papel fundamental na gestão do tráfego e na avaliação de impactos ambientais derivados do congestionamento.

Neste contexto, a gestão do tráfego urbano requer um modelo capaz de representar de forma simplificada, mas eficaz, a realidade do tráfego urbano, sendo que a sua implementação necessita de uma plataforma computacional, destacando-se o *software* ASTRID no processamento e tratamento dos dados importados.

Como os sistemas de transportes são distribuídos sobre o espaço, e tendo em consideração que os seus constituintes (ex: veículos, pessoas) deslocam-se neste espaço, conclui-se que o carácter espacial dos sistemas do tráfego urbano faz dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) uma alternativa valiosa para a modelação e gestão do tráfego urbano; mais precisamente, destaca-se os SIG para transportes (SIG-T) como plataformas adequadas para a análise e planeamento de transportes, em diversas áreas deste setor.

Só desta forma é possível contextualizar a aplicabilidade dos dados dinâmicos de sistemas UTC à gestão do tráfego urbano.

2.4.2. SOFTWARE ASTRID

2.4.2.1. Conceito de ASTRID e descrição de dados do SCOOT

O ASTRID consiste num *software* projetado para monitorizar e armazenar continuamente dados de tráfego a partir de mensagens periódicas geradas pelo sistema SCOOT para um posterior processamento e análise. Assim, pela sua capacidade de armazenamento de dados históricos, este *software* também serve como uma referência comparativa às possíveis condições de tráfego que possam ocorrer.

As informações armazenadas pelo ASTRID são adquiridas a cada minuto, e depois processadas com o intuito de reduzir o tamanho do ficheiro de dados e conseguir organizar de maneira mais apropriada para posterior acesso por parte de programas de base de dados. Isto permite que a informação sobre os estados atual e previsto da rede (baseada em dados históricos) seja acessível para uso por parte de outros sistemas de informação ou de deteção de incidentes. Os dados apresentados pelo ASTRID são recolhidos diretamente pelo SCOOT ou calculados a partir de informações armazenadas, sendo que o utilizador pode aceder ou exibir ambos os tipos de dados da mesma maneira (Bretherton, Wood e Raha 1998; SCOOT 2014).

A base de dados disponível através do ASTRID dispõe de variáveis do tipo básicas e do tipo derivadas. As variáveis do tipo básicas são recolhidas diretamente através de mensagens geradas pelo sistema SCOOT e as variáveis do tipo derivadas resultam de equações que combinam as variáveis do tipo básicas e os parâmetros da rede viária.

A seguir são descritas variáveis básicas disponíveis pelo ASTRID:

- a. Volume de tráfego: Volume de veículos por hora que chegam a uma secção de paragem, como modelado pelo SCOOT;
- b. Atraso: atraso total, em veículos*hora por hora, equivalente à média da fila de espera de veículos num arco (*link*), como modelado pelo SCOOT;

- c. Congestionamento: percentagem de intervalos de 4 segundos durante o período de verde em que um detetor se encontra ocupado por tráfego;
- d. Volume de tráfego no detetor: número de veículos que passam no detetor SCOOT;
- e. Ocupação no detetor: percentagem de ocupação de um detetor, resultante do número total de $\frac{1}{4}$ segundos em que o detetor está ocupado;
- f. Saturação num arco: grau de saturação de um arco, em percentagem;
- g. Comprimento de fases: tempo correspondente a cada fase, em segundos.

A seguir são descritas as variáveis do tipo derivadas disponíveis pelo ASTRID:

- a. Fator LPU: SCOOT processa dados de detetores nas suas unidades internas, *Link Profile Units* (LPU). LPU trata-se de uma combinação entre volume de tráfego e a ocupação no detetor. O volume no LPU pode ser relacionado com o volume de veículos através do uso de um fator de conversão LPU apropriado;
- b. Atraso por veículo: relação entre atraso e volume de tráfego, sendo o resultado dado em segundos. Estimativa do atraso sofrido pelos veículos num arco, não sendo afetado pelo número de LPU's por veículo nesse arco;
- c. Duração da viagem: adição entre o atraso por veículo e o tempo de viagem dos veículos entre o detetor SCOOT e o ponto de paragem. Estimativa do tempo que um veículo-padrão demora a percorrer um arco a uma velocidade média;
- d. Velocidade: obtida através do comprimento do arco, tempo de viagem e atraso por veículo;
- e. Indicador de congestionamento: obtido através do atraso por veículo e tempo de viagem;
- f. Ocupação do veículo: ocupação média de um veículo ao longo de um detetor, sendo calculada dividindo-se a ocupação veicular no detetor pelo volume de tráfego no detetor.

Assim, como o sistema SCOOT utiliza a unidade LPU para representar o volume de veículos, todas as variáveis do tipo derivadas são armazenadas e consideradas neste sistema de unidades. A captura e visualização dos dados são realizadas pelo *software* ASTRID, que transforma a unidade LPU em veículo equivalente; para além disso, o ASTRID permite a utilização de um único valor de fator LPU/veículo, associado a todos os arcos do sistema.

Em relação à apresentação dos seus dados, o *software* ASTRID distribuí-os pelos seguintes níveis:

- a. Detetor: detetores individuais abrangem, no máximo, 2 vias em cada direção;
- b. Arco: um arco SCOOT estará situado entre dois cruzamentos semaforizados, normalmente;
- c. Nó: inclui todos os arcos num nó ou cruzamento individual;
- d. Região: os nós numa rede SCOOT são agregados em regiões;
- e. Rota: qualquer grupo de arcos pode ser definido como uma rota, sendo que as rotas necessárias devem ser especificadas na etapa de recolha de dados;
- f. Área: providencia um resumo para toda a área controlada pelo SCOOT (Neto et al. 2004; SCOOT 2014).

Segundo SCOOT (2014), o *software* ASTRID gera os seguintes tipos de gráficos, que também podem ser produzidos como dados tabelados:

- a. Perfil: apresenta perfis de como a variável de dados escolhidos (ex: volume de tráfego ou congestionamento) varia ao longo do dia, para um dia ou semana particular. Os perfis são eficientes (se usado um fator pré-definido pelo utilizador), pelo que dão maior peso aos dados mais recentes da semana. Pode-se incluir no mesmo gráfico perfis correspondentes a dias da semana diferentes;

- b. Evolução: mostra como a variável de dados varia ao longo de um determinado intervalo de tempo. As datas de início e fim e os dias da semana incluídos no gráfico podem ser especificados. Diferentes períodos de tempo também podem ser escolhidos, incluindo os principais picos do dia;
- c. *Backup*: mostra o perfil de uma variável de dados para datas específicas;
- d. Máximo/Mínimo: mostra o perfil para uma variável de dados para um dia específico, juntamente com os valores máximo e mínimo desse mesmo dia;
- e. Desvio-padrão: mostra o perfil juntamente com gráficos de dois desvios-padrão, um acima e outro abaixo do perfil.

2.4.2.2. Consulta à base de dados modelada pelo SCOOT via *software* ASTRID

A consulta à base de dados modelada pelo sistema SCOOT é feita através de uma interface (*front end*) padrão do *software* ASTRID, em computadores terminais (PC), numa arquitetura cliente/servidor.

Na interface do *software* ASTRID é possível destacar cinco grupos de parâmetros de consulta, sendo eles: parâmetros espaciais (SCN), parâmetros temporais (datas/horários/dias da semana), tipos de arquivo de saída (*File Type*), variáveis de tráfego e formatos de exportação de dados (*Output*).

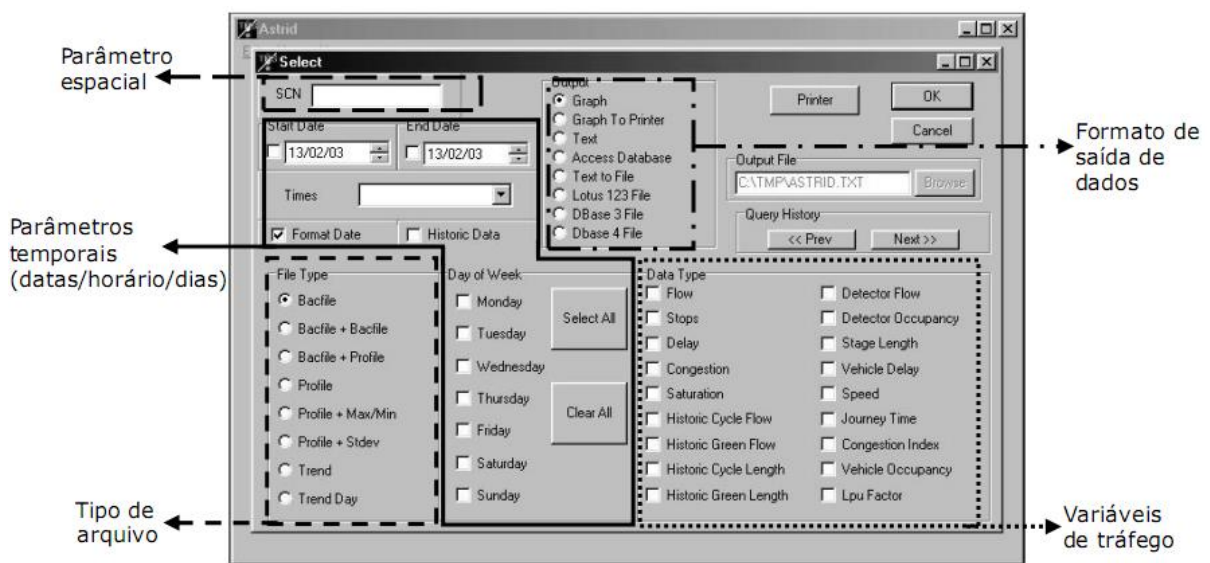


Figura 2.2 – Interface do *software* ASTRID para a consulta à base de dados do sistema SCOOT (Adaptado de Meneses, Carvalho e Loureiro 2003)

O parâmetro espacial permite ao utilizador especificar o elemento viário modelado pelo SCOOT que deve ser pesquisado. Os tipos e formatos de códigos de *SCOOT Control Number* (SCN) disponíveis no sistema SCOOT são:

- a. Semáforo, relativo a interseções semaforizadas;
- b. Arco, relativo a aproximações de interseções semaforizadas;
- c. Detetor, relativo a detetores de veículos em aproximações semaforizadas;
- d. Fases, relativo a comprimentos das fases de interseções semaforizadas;
- e. Rota, relativo a um conjunto de arcos;
- f. Área, relativo a um conjunto de semáforos;
- g. Região, relativo a um conjunto de áreas.

Os parâmetros temporais definem o período de dias, os dias da semana e o horário para uma consulta de dados específica. O período de dias é definido pelos campos Data Inicial (*Start Date*) e Data Final (*End Date*), e os dias da semana são especificados através de um conjunto de caixas de seleção da *frame* Dia da Semana (*Day of Week*), sendo que a seleção de dias também pode ser feita pelos botões *Select All* (seleciona todos os dias da semana), e *Clear All* (anula seleção de dias da semana); é importante salientar que a definição dos parâmetros temporais conta ainda com a opção *Historic Data*, que permite a consulta de dados históricos, quando assinalada.

Em relação às variáveis, estas são especificadas através de caixas de seleção na *frame* Tipo de Dados (*Data Type*). O utilizador seleciona quais as que devem ser pesquisadas marcando suas respectivas *check boxes*; as variáveis disponíveis para extração já foram mencionadas.

Definidos todos os parâmetros de consulta, a definição de formatos de exportação de dados é feita através da *frame* *Output*, podendo ser efetuada pelos oito formatos indicados na figura; as três opções iniciais permitem visualização imediata dos dados, enquanto as outras são armazenadas em pastas específicas pelo utilizador (Meneses, Carvalho e Loureiro 2003).

2.4.2.3. Limitações do *software* ASTRID

Apesar do ASTRID disponibilizar uma vasta gama de dados e formatos de saída, o *front end* deste sub-sistema apresenta uma série de limitações para a consulta à base de dados do SCOOT.

Primeiro, os dados importados não dispõem de um atributo espacial, o que dificulta a realização de análises espaciais sistemáticas. Segundo, a modelação usada para determinar as variáveis e tipos de arquivos não é documentada de forma clara, o que dificulta a análise das condições de tráfego descritas pelos dados fornecidos pelo ASTRID. Terceiro, o referido *front end* só permite a consulta a um único elemento viário (ex: arco), apesar de ser possível consultar códigos SCN que agrupem vários elementos viários modelados pelo SCOOT (ex: SCN de uma rota inclui vários arcos); esta restrição torna ineficiente a consulta simultânea a múltiplos elementos viários, tendo em vista que são necessárias consultas individuais para cada elemento. Isto resulta num conjunto de arquivos particularizados por elemento viário ou código SCN consultado (ver Quadro 2.3).

Além destas restrições, o *front end* do ASTRID permite a consulta apenas a sete horários pré-definidos, muito embora seja possível uma consulta a qualquer intervalo horário, por meio de conexão remota com o SCOOT; esta particularidade torna inflexíveis os períodos horários de consulta e requer a consolidação prévia de dados recuperados pelo ASTRID. Além disso, o *front end* do ASTRID não inibe as combinações inválidas de parâmetros de consulta, embora nem todas as variáveis estejam disponíveis para todo o tipo de elementos viários, como demonstra o quadro 2.3. Uma requisição com parâmetros inválidos retorna valores nulos, o que pode levar a conclusões equivocadas a respeito da consulta de dados solicitada (Meneses, Carvalho e Loureiro 2003).

Quadro 2.3 – Variáveis modeladas pelo SCOOT e disponibilizadas pelo ASTRID por SCN (Adaptado de Meneses, Carvalho e Loureiro 2003)

Variável modelada pelo SCOOT	Categorias disponibilizadas pelo ASTRID por SCN
Volume de veículos [veic/h]	Região, Área, Rota, Semáforo, Arco
Paragens [veic/h]	Região, Área, Rota, Semáforo, Arco
Atraso [veic*h/h] ou Fila [veic]	Região, Área, Rota, Semáforo, Arco
Congestionamento [%]	Região, Área, Semáforo, Arco
Grau de saturação [%]	Região, Área, Rota, Semáforo, Arco
Histórico de volume durante o ciclo [lpu]	Arco
Histórico de volume durante a fase de verde [lpu]	Arco
Histórico de comprimento de ciclo [s]	Arco
Histórico de comprimento da fase de verde [s]	Arco
Volume detetado [veic/h]	Detetor
Ocupação do detetor [%]	Detetor
Comprimento de fase [s]	Região, Área, Semáforo, Fase
Atraso por veículo [s]	Região, Área, Rota, Semáforo, Arco
Velocidade [km/h]	Arco
Tempo de viagem [s]	Arco
Indicador de congestionamento [-]	Arco
Ocupação por veículo [ms/veic]	Detetor
Fator <i>Link Profile Unit</i> [lpu/veic]	Detetor

2.4.3. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICAS

2.4.3.1. Conceito e elementos constituintes de SIG

Os avanços tecnológicos na área de informática vieram permitir um uso mais eficiente dos computadores para recolha e tratamento de dados. Quando uma das características pertinentes a ter em conta é a localização (referência espacial), os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) apresentam um papel fundamental.

Um SIG pode ser definido como um sistema integrado de recolha, armazenamento, análise e tratamento de dados espaciais. Esta ferramenta é capaz de gerar informações que proporcionam soluções rápidas e precisas para diversos problemas, facilitando o processo de tomada de decisão em inúmeras áreas, desde a agricultura ao planeamento urbano (Bethel e Thurgood 2003; Silva 1998).

Segundo Filho e Iachpe (1996), um SIG pode ser subdividido em:

- a. Banco de dados,
- b. Equipamento (*hardware*), e

- c. Operadores espaciais: conjunto de programas (*softwares*) dedicados à execução de operações sobre os dados.

O Banco de Dados é composto pela base de dados física, e por programas que gerem esses dados, isto é, organizam os mesmos com a finalidade de aligeirar a sua procura, manutenção e controlo. As estruturas de representação dos dados espaciais podem ser classificadas em *Matricial (Raster)* e *Vetorial*. A estrutura matricial divide o espaço em elementos discretos, obtendo-se uma malha com linhas verticais e horizontais, formando-se, assim, células (*Picture element* ou quadrículas), diretamente relacionadas com o nível de resolução associado à precisão do processo. Por sua vez, a estrutura vetorial considera o espaço de forma contínua, de forma a reduzir os dados espaciais a três formas básicas: pontos, linhas ou áreas.

Quanto ao *Hardware*, os SIG têm capacidade para operarem em qualquer tipo de porte, desde microcomputadores a macrocomputadores, o que torna a sua utilização possível em praticamente qualquer ambiente de trabalho.

Os Operadores espaciais figuram um conjunto de programas que atuam sobre a base de dados, capazes de produzir as informações ambicionadas, tais como: localização de uma entidade e/ou listagem dos seus atributos, traçado de redes, cálculos estatísticos, reagrupamento de dados.

Embora os SIG sejam bastante divulgados como uma ferramenta fundamental para a resolução de problemas associados ao planeamento urbano e, mais recentemente, ao planeamento de transportes, tal não acontece da forma simples e eficaz que aparenta ser. O emprego de SIG como ferramenta depende, além dos três elementos já mencionados, de um quarto elemento: recursos humanos.

A aquisição dos programas de computador e dos equipamentos é relativamente simples, pois só depende dos recursos financeiros disponíveis. Por outro lado, os bancos de dados são elementos que exigem grande atenção em qualquer implantação de SIG, sendo a sua aquisição um processo caro e complexo, que exige que se recorra às mais variadas fontes.

A entrada desses dados no sistema é também uma fase extremamente importante da implantação de um SIG, visto ser através dela que é garantida a qualidade, precisão e a confiabilidade do produto final.

Todavia, de todos os elementos constituintes dos SIG, os recursos humanos são os mais difíceis de obterem-se, pois exigem um período de treino e adaptação relativamente longo para atingir-se um nível aceitável de capacitação (Bethel e Thurgood 2003; Dantas et al. 1997; Silva 1998).

Assim, é possível apresentar uma representação gráfica de um Sistema de Informação Geográfica (Figura 2.3):

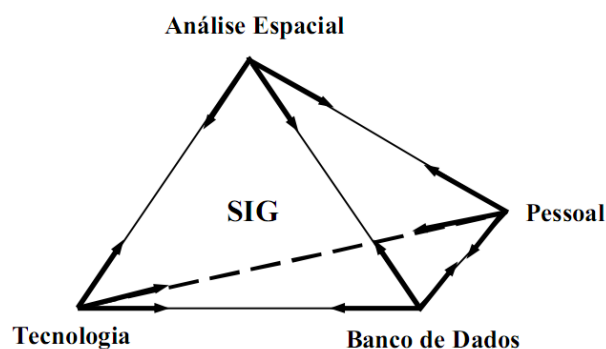


Figura 2.3 – Elementos constituintes de um SIG (Dantas, Taco e Yamashita 1996)

2.4.3.2. Aplicação dos SIG em Transportes

Os Sistemas de Informação Geográfica tornaram-se numa importante ferramenta para a resolução de problemas de transportes, sendo esta área específica denominada pelo acrónimo SIG-T (GIS-T, *Geographic Information Systems for Transportation*).

Os SIG-T têm a capacidade para desempenhar um papel fundamental no panorama atual sobre decisões relacionadas com a ocupação do solo público e transportes. Ao permitir que uma ampla gama de informações seja integrada com base no local em estudo, este sistema promove uma perspetiva mais abrangente para problemas complexos relacionados com o uso do solo e transportes.

Para além disso, SIG-T permite que ferramentas analíticas e computacionais possam ser usadas em conjunto com representações detalhadas da geografia local, possibilitando que análise e resolução de problemas sejam adaptadas ao contexto local. SIG-T também pode reduzir significativamente o abismo entre a análise e a comunicação, permitindo o incremento da participação pública nas decisões analíticas, como escolha de dados, premissas de modelação e desenvolvimento de cenários, e, ainda, tornar a informação de transporte mais acessível, potenciando o melhoramento das tomadas de decisão quanto à localização e transporte e encorajando a participação pública no processo de organização de transportes (Miller e Shaw 2001; Silva 1998; Thill 2000).

Assim sendo, os Sistemas de Informação Geográfica, por permitirem manusear, atualizar, alterar ou acrescentar outras informações, ou ainda trabalhar com apenas parte dos dados, em função do problema em questão, funcionam muito bem para as informações tipicamente necessárias nos modelos de transportes; essas informações retiradas dos SIG podem ser, segundo Miller e Shaw (2001) e Silva (1998):

- a. Dados socioeconómicos e demográficos da população (habitantes, empregos, produção industrial, etc);
- b. Dados sobre características de uso e ocupação do solo;
- c. Dados com descrição da oferta de transportes;
- d. Dados com descrição da procura de transportes.

Desta forma, os SIG-T fornecem ao utilizador um amplo acesso a bases de dados geográficos e de transportes, e a possibilidade de combinar esses dois elementos de inúmeras maneiras. Essa característica faz com que este sistema seja útil em diversas aplicações, tais como:

- a. Gestão de vias rodoviárias (semáforos, pavimentos, sinalização);
- b. Planeamento urbano;
- c. Análise de impactos ambientais;
- d. Gestão de congestionamento em tempo real;
- e. Análise de acidentes;
- f. Planeamento operacional de qualquer modo de transporte (Silva 1998; Thill 2000).

Em suma, é possível afirmar que os Sistemas de Informação Geográfica em Transportes é mais do que apenas um domínio de aplicação da funcionalidade de um SIG genérico. SIG-T tem diversos requisitos para modelação, manipulação e análise de dados, que não são preenchidos por um *software* SIG convencional, sendo exemplos disso aspetos como a análise do caminho mais curto, análises de procura de transportes, análises da fluidez de tráfego na rede e gestão de tráfego, análises de acessibilidade multimodal, área de influência de determinado local pela infraestrutura de transportes, impacto dos sistemas de transporte, entre outros.

Deste modo, o SIG-T aproxima-se em diversos aspetos de *softwares* de modelação de transportes, de forma que se pode afirmar que os SIG-T são resultado da simbiose entre os Sistemas de Informação

Geográfica, SIG, e os chamados Sistemas Inteligentes de Transporte, ITS (Goodchild 2000; Silva 2006). De seguida, apresenta-se uma figura ilustrativa ao referido anteriormente:

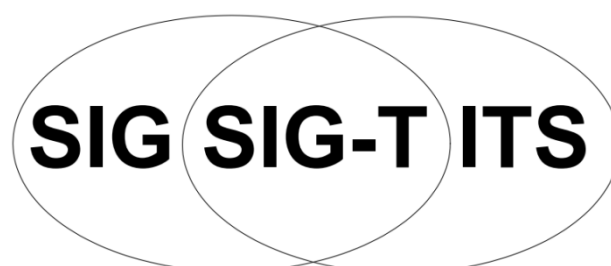


Figura 2.4 – Simbiose entre SIG e ITS originando SIG-T

2.4.3.3. Limitações e futuro dos SIG e SIG-T

Embora os sistemas SIG tenham evoluído consideravelmente na integração da dimensão espacial com atributos de objetos espaciais, estes ainda apresentam uma profunda limitação na extensão temporal.

De facto, um dos maiores desafios que ainda enfrenta-se atualmente em SIG-T é desenvolver SIG que tenham em conta o parâmetro temporal, para posterior utilização em investigação e aplicações no transporte dinâmico, que melhor representem e modelem movimentos dinâmicos, interações, mudanças e procedimentos. Sendo assim, são necessários modelos de dados de SIG operacionais que consigam representar, pesquisar, analisar e visualizar o carácter dinâmico dos desafios no Transporte (Goodchild 2000; Shaw 2010; Silva 1998). Segundo Shaw (2010), vários autores estão atualmente a desenvolver abordagens específicas para ultrapassar-se esta dificuldade, como Frihida et al. (2004) e Shaw e Yu (2009).

Outra questão bastante atual e pertinente é a existência das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), principalmente a Internet, que vieram alterar expressivamente a forma de acesso aos dados e informação; por exemplo, as redes sem fios proporcionam uma extensa portabilidade e flexibilidade, tanto na recolha, como no acesso e na distribuição de dados de informação. Assim, devido à inserção destas novas tecnologias na sociedade (empresas e população em geral), os SIG-T devem também aproveitar as suas vantagens, incorporando-as.

Ainda outro desafio relevante para os SIG-T é o seu desempenho em reunir e integrar dados relativos aos sistemas de transporte que, tradicionalmente, ainda encontram-se separados por diversas aplicações.

Por fim, é necessário ter em atenção que, devido ao custo ainda elevado agregado ao SIG-T, nem todos os países conseguem usufruir desta tecnologia, principalmente os denominados países em desenvolvimento; nestes casos, é ainda priorizada a redução de custos das cidades através de estratégias de tributação ou de medidas que otimizem o uso dos escassos recursos à disposição (Silva 1998; Silva 2006; Thill 2000).

2.4.4. APLICAÇÃO DE DADOS DINÂMICOS DO SISTEMA UTC À GESTÃO DO TRÁFEGO URBANO

2.4.4.1. Estrutura de utilização de dados de sistemas UTC

Os dados recolhidos por sistemas UTC têm como função primordial otimizar a operação de interseções semaforizadas. No entanto, apesar destes dados serem utilizados primordialmente em tempo real, também podem ser guardados e utilizados ao nível do da denominada Gestão Integrada de Transportes, ou seja, integrar o Planeamento de Transportes com a Gestão do Tráfego, no sentido de operarem em conjunto com benefícios mútuos, servindo-se dos mesmos dados e impulsionando estratégias para uma melhor qualidade de todo o sistema de transportes.

Embora estes dois processos operem a prazos diferentes (médio/longo prazo versus tempo real), ambos têm como objetivo influenciar a geração de viagens, a escolha modal e a escolha de percursos entre as diferentes zonas de origem e de destino. Um esquema funcional entre o planeamento de transportes e gestão de tráfego é apresentado pela figura 2.5.

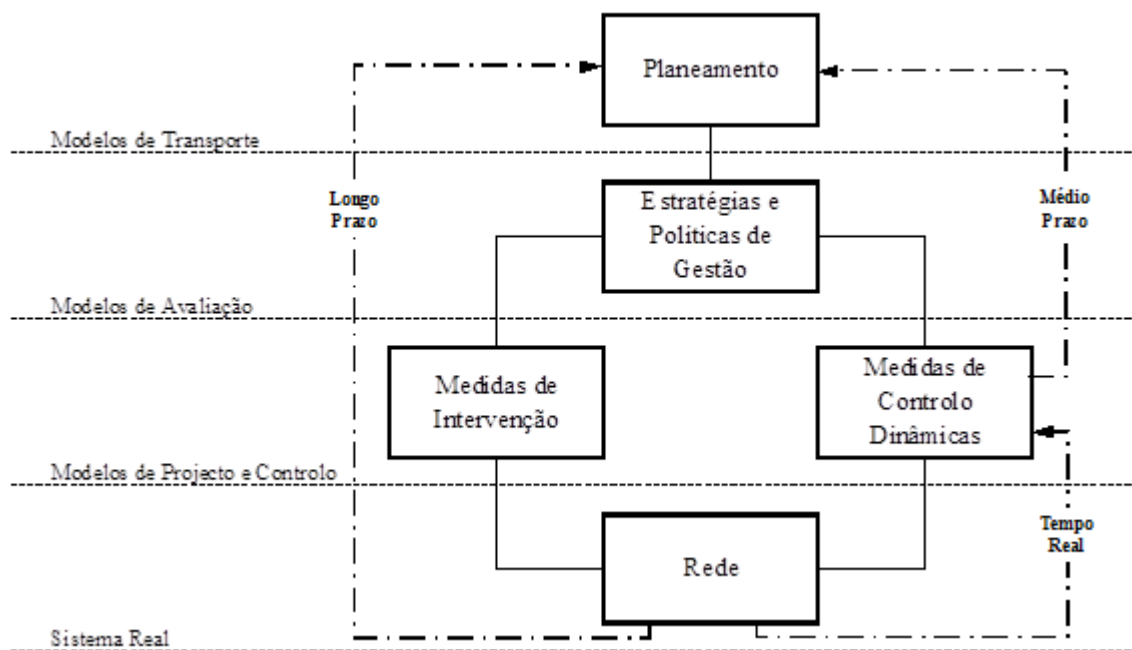


Figura 2.5 – Gestão integrada de transportes (Adaptado de APAS 1996, citado em Tavares 2003)

Neste contexto, os dados obtidos pelos diferentes métodos (ex: imagens de vídeo, veículos testes, sensores eletromagnéticos) necessitam ser filtrados e agregados. A filtragem elimina as discrepâncias e melhora a confiabilidade dos dados, pelo que, este passo é fundamental para o sucesso de possíveis aplicações futuras. Por outro lado, a agregação integra os dados em diferentes desígnios e níveis de agregação, bem como os separa em graus de exatidão e disponibilidade, segundo os requisitos/necessidades dos utilizadores.

Para além da filtragem e da agregação de dados, devem ser desenvolvidos processos de preenchimento de lacunas nas bases de dados provocadas por falhas nos métodos de recolha de dados (Coifman e Yang 2004; Dahlgren et al. 2002; Kikuchi, Miljkovic e Zuylen 2000; Tavares 2003).

De seguida, os resultados da filtragem e agregação de dados devem ser incorporados numa base de dados de consulta, sob a forma de variáveis básicas; esta base de dados deve apresentar formas de apresentação distintas para os vários tipos de utilizadores.

Desta forma, esta disponibilidade de informações, provenientes de diferentes métodos, favorece o uso eficiente da rede viária por parte dos utilizadores, a gestão eficaz do tráfego urbano pelos técnicos e, ainda, a utilização adequada e eficiente de investimentos no sistema viário pelos gestores públicos (Shladover 2002).

Segundo Dahlgren, Turner e Garcia (2002), para além dos utilizadores, técnicos e gestores públicos, ainda existem outros utilizadores dos dados recolhidos pelos sistemas UTC, por tipo de dado de tráfego, como ilustra o quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Tipo de dados de um sistema UTC vs. Tipo de utilizador (Adaptado de Dahlgren, Turner e Garcia 2002)

Tipo de dados	Utilizador em geral	Fornecedores de informações de tráfego	Operadores de sistemas de transporte	Planeadores e gestores públicos	Projetistas de infraestruturas viárias	Investigadores
Tempo de viagem	X	X	X	X	X	X
Densidade e volume de tráfego		X	X	X	X	X
Dados de tráfego brutos						X
Incidentes viários	X	X	X			

2.4.4.2. Medidas de desempenho do tráfego derivadas de dados de sistemas UTC

Uma base de dados do tráfego de um sistema UTC proporciona a definição e determinação de múltiplas medidas de desempenho do tráfego urbano, a partir das suas variáveis básicas.

A partir de Brydia et al. (1998) e Dahlgren, Turner e Garcia (2002), é possível enumerar os seguintes potenciais usos das medidas de desempenho:

- a. Indicadores de condições operacionais do sistema UTC;
- b. Indicadores de incidentes de tráfego;
- c. Indicadores de nível de segurança das instalações viárias;
- d. Medidas de avaliação de estratégias de controlo de tráfego;
- e. Medidas de distribuição espaço-temporal de volume do tráfego, tempo de viagem e atraso na rede viária.

Estas e outras medidas de desempenho são criadas e utilizadas através de um processo que, como já foi mencionado, tem em conta a base de dados de sistemas UTC; segundo Dahlgren, Turner e Garcia (2002), este processo pode ser representado pela figura 2.6.

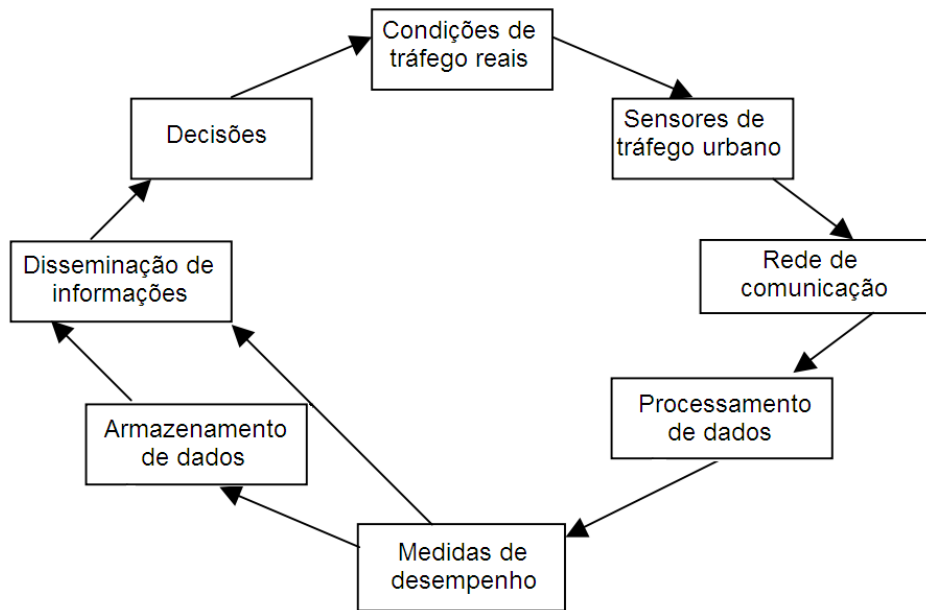


Figura 2.6 – Componentes de um sistema de tráfego (Adaptado de Dahlgren, Turner e Garcia 2002)

De acordo com a figura 2.6, o sistema UTC usa sensores do tráfego para estimar as condições do tráfego reais; estes sensores enviam dados brutos recolhidos *in situ* para a central de controlo, através de uma rede de comunicação fechada (exclusiva). Em seguida, os dados são processados e convertidos em indicadores de desempenho do tráfego urbano. O nível de agregação, exatidão e disponibilidade destes indicadores variam de forma individual, segundo as necessidades do tipo de utilizador a que se destinam.

De seguida, estes indicadores são armazenados numa base de dados apropriada para futuras consultas, e/ou enviados diretamente aos utilizadores finais (gestores públicos, operadores de tráfego e utilizadores em geral). Por sua vez, estes tomam decisões que afetam o sistema do tráfego urbano, com base nas informações disseminadas a partir das medidas de desempenho desenvolvidas.

Porém, é necessário ter em consideração que, para qualquer responsável pelas decisões, este processo pode ter várias falhas em várias fases:

- Os sensores podem não estar a funcionar corretamente, ou de todo, em pontos críticos;
- As comunicações/troca de informações podem estar com problemas;
- O processamento de dados pode não incluir controlo eficaz de erros e pode não fornecer informações de forma útil para todos os utilizadores;
- Os dados podem não estar arquivados por um período suficientemente longo;
- Os métodos de disseminação de dados podem não ser os adequados;
- Os responsáveis pelas decisões podem não ter ferramentas ou recursos suficientes para rentabilizar ao máximo as medidas de desempenho nas tomadas de decisão (Dahlgren, Turner e Garcia 2002).

3

Indicadores Caracterizadores das Condições de Circulação em Meio Urbano

3.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido, a procura pela mobilidade sustentável envolve inúmeras atividades, como o planeamento e a monitorização da infraestrutura rodoviária, e seus elementos constituintes. Nessa linha de raciocínio, para que os investimentos (financeiros, de recursos humanos e de tempo) sejam bem empregues, é fundamental o conhecimento das características dessa infraestrutura e do desempenho que proporciona para a função de circulação.

Assim, este conhecimento pode ser interpretado a partir de uma hierarquização dos arcos (ou ramos) da rede viária, no qual se refere ao seu desempenho, de forma a poder-se identificar quais os que têm maior impacto.

Para tal, recorre-se a indicadores específicos para conseguir-se esta classificação hierárquica e, conseqüentemente, a medidas de desempenho para uma qualificação mais explícita da qualidade de circulação desses mesmos arcos.

Desta forma, o presente capítulo inicia-se com uma apresentação generalizada de medidas de desempenho e indicadores de desempenho, sendo que segundo Ferreira (1987), a medida de desempenho fornece indicações, enquanto o indicador apresenta-se como um número, adimensional ou não, que pode servir para a comparação de situações diversas. Os conceitos de medida e indicador são, portanto, muito semelhantes, sendo que para o presente trabalho, uma medida de desempenho deve ser entendida como o conceito geral utilizado para parâmetros que permitam obter indicações, enquanto o indicador de desempenho trata-se apenas de um número, podendo ser representativo de uma dada medida de desempenho.

Posteriormente, estuda-se os principais indicadores de desempenho encontrados na literatura, nomeadamente aqueles relacionados com a fluidez do tráfego rodoviário, comentando a sua aplicabilidade na realidade do trânsito urbano.

Por fim, estes indicadores são analisados e classificados de acordo com os seguintes atributos: abrangência, congestionamento, confiabilidade, vulnerabilidade, risco e flexibilidade.

3.2. CONCEITO E DESENVOLVIMENTO DE MEDIDAS E INDICADORES DE DESEMPENHO

A Gestão Integrada de Transportes inclui objetivos que motivam a definição de medidas de desempenho, através da análise dos dados disponíveis, do respetivo cálculo e da seleção dos mesmos em função dos objetivos, que, posteriormente, serão utilizadas num processo de avaliação de alternativas, apoio à tomada de decisão e contínua monitorização do sistema. Observe-se que não existe uma medida única de desempenho, visto esta depender dos objetivos, e podendo ser, por isso, uma combinação pesada de vários indicadores de desempenho que fornecem medidas quantitativas e qualitativas relacionadas a um dos aspetos de desempenho da infraestrutura rodoviária.

Genericamente, encontra-se definida para cada componente do sistema viário uma metodologia para avaliar a capacidade e o respetivo nível de serviço, e, como tal, existem medidas de desempenho para auxiliarem na gestão e no planeamento de tráfego de forma a prevenir o congestionamento no sistema viário.

Uma medida de desempenho deve relacionar-se, de forma explícita, com os objetivos identificados. O risco é que a utilização de uma única medida de desempenho poderia afetar o tipo de projetos selecionados, o que iria proporcionar problemas, que devem ser reduzidos através da adição de várias medidas para avaliar o desempenho do sistema e, possivelmente, combiná-las dentro de um indicador composto sintético. No entanto, esse conjunto de medidas deve ser escolhido tendo em conta o caso em estudo e, ainda, se a tomada de decisão envolve o público em geral, como os decisores e grupos de interesse, ou se envolve apenas profissionais especializados.

De facto, os responsáveis pelas decisões que representam o público preferem, geralmente, indicadores de desempenho e consequentes medidas que os seus eleitores percebam, designadamente que traduzam a qualidade de circulação, por exemplo, o atraso ou a velocidade de percurso. Por outro lado, outros indicadores, tais como a relação volume/capacidade ou a taxa de ocupação não são indicadores com que os utilizadores facilmente se identifiquem. Consequentemente, ao selecionar as medidas de desempenho a analisar, é importante ter-se em consideração o contexto em que estas serão utilizadas. Deste modo, pode ser necessário o uso de diferentes medidas de desempenho, especialmente quando são apresentadas tanto a perspetiva do utilizador, como a do gestor do sistema viário (Kaparias, Bell e Tomassini 2011; TRB 2010).

Assim sendo, segundo Litman (2007), a escolha das medidas de desempenho deve respeitar os seguintes princípios:

- a. As medidas de desempenho relacionam-se com os objetivos requeridos;
- b. As medidas de desempenho são importantes para a gestão de tráfego;
- c. Os dados de base são precisos e de confiança;
- d. O conjunto de medidas de desempenho refletem com o máximo de exatidão possível o funcionamento real do sistema viário;
- e. Existe pelo menos uma medida de desempenho para cada objetivo definido.

No entanto, tendo em vista uma mobilidade sustentável, as medidas de desempenho devem refletir não só a perspetiva dos utentes e gestores de tráfego, que têm em consideração apenas aspetos de ordem económica e social, mas também devem refletir a importância de uma mobilidade "amiga do ambiente", e devido às vantagens inerentes, ter em atenção os futuros utilizadores do sistema viário. O quadro 3.1 apresenta exemplos de impactos que as medidas de desempenho podem ter que considerar.

Quadro 3.1 – Impactos a considerar na mobilidade sustentável (Adaptado de Litman 2007)

Impactos		
Económicos	Sociais	Ambientais
Congestionamento	Equidade	Poluição do ar
Custo da infraestrutura	Impactos na mobilidade	Mudanças climáticas
Despesas dos utilizadores	Impactos na saúde humana	Poluição sonora e da água
Obstáculos na circulação	Coesão social	Degradação e perda de habitat
Prejuízos de acidentes	Habitabilidade	Impactos hidrológicos
DNRR	Atratividade estética	DNRR

Nota: DNRR (*Depletion of Non-Renewable Resources, Esgotamento de Recursos Não Renováveis*)

Desta forma, as medidas de desempenho estão relacionadas com grandes temas, como a eficiência da circulação, segurança rodoviária, redução da poluição e inclusão social. Assim, devido à complexidade inerente às medidas de desempenho, estão-lhes associados inúmeros requisitos importantes para o seu desenvolvimento.

Pode-se afirmar que o requisito mais importante é a avaliação dos benefícios através da análise dos impactos traduzida pelos diferentes indicadores. Esta avaliação não significa necessariamente a comparação direta da eficácia das políticas em diferentes cidades, mas sim o benefício de um investimento específico contra o seu custo.

Outro atributo importante a ter em conta nas medidas de desempenho é a capacidade de ajudar os gestores de tráfego nos processos de tomada de decisão. Este fator está intimamente ligado ao requisito anterior, uma vez que a avaliação dos custos e benefícios das políticas e tecnologias existentes oferece assistência inestimável na tomada de decisão sob a forma de “lições aprendidas”. No entanto, é frequente não existirem estudos do caso anterior, pelo que as decisões têm que ser feitas com base em projeções, sendo, portanto, importante garantir que as projeções são suportadas *a priori* por uma medida de desempenho.

Será também importante que as medidas de desempenho devam fazer uso de dados existentes e não devam implicar a obtenção de quaisquer novos dados e, ainda, ter em consideração a especificidade das cidades em vez de adotar uma abordagem global (“um-para-todos”).

Por último, mas não menos importante, as medidas de desempenho devem ser fáceis de calcular e simples de transmitir ao público. É importante que os indicadores se inspirem num processo de planeamento orientado para o cliente e devam fazer um esforço adicional para avaliar a satisfação do cliente e a perceção do desempenho do sistema de transporte.

Todavia, é importante referir que não se deve negligenciar as medidas de desempenho que refletem parâmetros mais subjetivos (ex: medidas de desempenho que representam a perceção de segurança por parte do utilizador), devido à dificuldade inerente à sua construção; para além disso, as medidas de desempenho devem equilibrar as necessidades do sistema e os benefícios que estas trazem para esse mesmo sistema a curto e longo prazos.

Em suma, o processo de formulação de medidas de desempenho deve começar com a definição dos objetivos que os responsáveis pelo planejamento tencionam atingir. Por conseguinte, as medidas de desempenho monitorizadas são ligadas ao objetivo implementado e o processo de medição informa os responsáveis pelas decisões de quão bem os objetivos estão a ser conseguidos.

O desenvolvimento de medidas de desempenho assume especial relevância aquando da construção de indicadores complexos, com a finalidade de comparar diferentes projetos com diferentes cenários futuros e avaliar projetos em períodos diferentes de tempo; neste caso, a experiência assume um papel fundamental.

A magnitude dos problemas identificados pelos responsáveis de tomada de decisão produz-lhes desafios, uma vez que enfrentam decisões de compromisso para evitar a excessiva complexidade que cresce com o volume de informação recolhida. Os problemas podem ser encontrados no que diz respeito à acessibilidade, mobilidade, qualidade de vida, eficácia operacional, desempenho e condições de funcionamento do sistema (Kaparias, Bell e Tomassini 2011; TRB 2010).

Assim, as medidas de desempenho devem satisfazer algumas propriedades que, pela sua definição, constituem os seus próprios critérios de seleção. Segundo Diógenes (2004) e Kaparias, Bell e Tomassini (2011), as propriedades ou requisitos podem ser:

- a. **Mensurabilidade:** as medidas de desempenho devem ser mensuráveis com ferramentas e recursos disponíveis, custos razoáveis em relação ao orçamento, níveis de precisão comparáveis em termos dos requisitos, e os dados recuperáveis através de medições de campo;
- b. **Previsibilidade:** as medidas de desempenho devem permitir comparar projetos ou estratégias alternativas futuras, e também devem permitir o uso de ferramentas de previsão existentes para a sua definição;
- c. **Clareza:** as medidas de desempenho devem ser compreensíveis para os decisores políticos, profissionais envolvidos e público em geral;
- d. **Utilidade:** as medidas de desempenho devem refletir o mais diretamente possível o problema em questão;
- e. **Temporalidade:** as medidas de desempenho devem ser comparáveis ao longo do tempo, ou seja, devem ser capazes de expressar a extensão temporal do congestionamento ou outras condições, devendo encaixar o período de estudo e tomada de ação;
- f. **Escala geográfica:** as medidas de desempenho devem ser aplicáveis a diferentes níveis geográficos (nacional, regional, local) e ser igualmente úteis;
- g. **Controlo:** as medidas de desempenho devem permitir aos responsáveis de tomada de decisão o controlo e correção da característica medida;
- h. **Relevância:** as medidas de desempenho devem ser relevantes para o planejamento e elaboração do processo de conceção, e a sua análise deve fornecer aos responsáveis informações pertinentes.

Estas características são, obviamente, flexíveis e várias organizações de planejamento usam diferentes critérios conforme as suas necessidades, recursos e potencialidades. Para além disso, deve-se notar que a maioria dos problemas está relacionada com o custo da recolha de dados e o seu processamento.

As medidas de desempenho são selecionadas de acordo com os dados necessários e recolhidos. Em teoria, é preferível ter os objetivos a definir os dados e as medidas de desempenho essenciais, de forma a ter uma base sólida da avaliação do desempenho do sistema. Porém, na prática, é difícil responder a todas as necessidades e suportar todos os custos para a recolha dos dados e implementação de todas os meios/ferramentas necessários. Ainda mais, é pertinente salientar que, em alguns casos, é fundamental

uma quantidade e variedade de dados não tradicionais; exemplo disso é o estudo das medidas de desempenho associadas à inclusão social, no qual são imprescindíveis informações socioeconômicas.

A abordagem mais utilizada na prática consiste em identificar as medidas ideais que se relacionam com um objetivo específico e, em seguida, trabalhar para trás para substituir as medidas usando os dados imediatamente disponíveis. A intenção é convergir para medidas ideais ao longo do tempo, de acordo com a disponibilidade de recursos, o sucesso com as medidas substituídas e as prioridades da organização de planejamento (Kaparias, Bell e Tomassini 2011).

3.3. MEDIDAS DE DESEMPENHO E RESPECTIVOS INDICADORES CARACTERIZADORES

3.3.1. NÍVEIS DE SERVIÇO DERIVADOS DO HCM E RÁCIO VOLUME/CAPACIDADE

O *Highway Capacity Manual* (TRB 2010) apresenta inúmeras variáveis caracterizadoras de medidas de desempenho, tais como a velocidade, densidade ou atraso; para além disso, ainda apresenta o conceito de capacidade, variável imprescindível no estudo de qualquer infraestrutura rodoviária.

A capacidade é definida como o número máximo de veículos que podem passar por um determinado ponto ou segmento de estrada durante um período de tempo específico, em condições normais de via, tráfego e controlo, pelo que é assumido que não há qualquer influência por parte do tráfego a jusante.

Várias medidas de desempenho podem resultar das análises realizadas a partir do HCM, sendo que, ou desempenham um papel fundamental na tomada de decisão, ou servem de apoio a um modelo de planejamento na construção das suas próprias medidas de desempenho. Em última análise, os métodos do HCM produzem resultados que suportam a tomada de decisão.

Inicialmente, até 1965, o estudo de tráfego baseava-se fundamentalmente na relação Volume/Capacidade (V/C), sendo que seria possível utilizar este indicador de desempenho para classificar-se o congestionamento em três níveis:

- a. Congestionamento Leve: $0,7 \leq V/C \leq 0,84$;
- b. Congestionamento Moderado: $0,85 \leq V/C \leq 0,99$;
- c. Congestionamento Intenso: $V/C \geq 1$.

Todavia, a relação V/C não prevaleceu durante muitos anos devido à dificuldade de interpretação a que está associada. De facto, em 1965, o HCM introduziu o conceito de nível de serviço (NS), que procura avaliar o serviço que a estrada proporciona aos seus utilizadores, ou seja, avalia a qualidade de circulação.

Assim, o dimensionamento da infraestrutura é feito, não por critérios de aptidão para satisfazer unicamente a procura, mas sim tendo em conta o desempenho que prevê-se que essa infraestrutura possa ter. Isto é, pretende-se garantir certas condições de escoamento, que terão exigências diferentes conforme a importância que se pretenda atribuir à estrada em estudo, daí a importância da hierarquização das vias em níveis de desempenho.

O HCM define, independentemente do tipo de infraestrutura, 6 níveis de serviço designados pelas letras de A a F. O nível de serviço A corresponde ao regime de escoamento livre com condições de circulação muito boas. À medida que as condições de circulação degradam-se, atinge-se os níveis B e C, que representam um escoamento ainda estável; por sua vez, o nível D é atribuído quando o escoamento aproxima-se da instabilidade. O nível de serviço E representa condições de escoamento instáveis, resultantes dos débitos (volumes) de tráfego serem elevados com valores perto da

capacidade, sendo que ao escoamento em regime de sobressaturação, correspondente a situações de congestionamento, é reservado o nível de serviço F (Oliveira 2012; TRB 2010; SVC 2014).

Para caracterizar o serviço que a estrada oferece, é tido em consideração diversos indicadores, entre os quais podem destacar-se os seguintes: velocidade (ou tempo) de percurso, atrasos e paragens, restrições à liberdade de manobra dos condutores, custo, segurança, etc.

Assim, é natural que em meio urbano a medida de desempenho Nível de Serviço dependa de indicadores que caracterizem o melhor possível a mobilidade e acessibilidade existentes nas vias.

No caso das interseções não semaforizadas, evidencia-se um distúrbio na viagem dos condutores cujo movimento não seja o prioritário. Nestas situações, e em face da observação que faz dos movimentos prioritários, o condutor não prioritário toma a decisão de avançar ou não, tendo por base a amplitude dos intervalos de tempo entre veículos prioritários sucessivos e o risco que está disposto a assumir. Assim, a sua decisão vai depender da comparação que o condutor faz entre a estimação do valor dos intervalos de tempo entre veículos prioritários e o designado intervalo crítico, que representa o menor intervalo de tempo entre veículos prioritários sucessivos aceitável, sendo que se este último for inferior ao intervalo entre veículos, o condutor avança. Desta forma, segundo o HCM, o nível de serviço correspondente a uma interseção prioritária tem como indicador de desempenho o atraso médio por veículo não prioritário.

Assim sendo, uma expressão que permite determinar o atraso médio para cada movimento não prioritário \underline{x} é a seguinte:

$$d = \frac{3600}{C_{m,x}} + 900T \left[\frac{v_x}{C_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{v_x}{C_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{m,x}}\right)\left(\frac{v_x}{C_{m,x}}\right)}{450T}} \right] \quad (3.1)$$

em que,

d – Atraso médio para o movimento não prioritário \underline{x} [seg];

v_x – Débito horário de chegada do movimento não prioritário \underline{x} [uvt/h];

$C_{m,x}$ – Capacidade real do movimento não prioritário \underline{x} [uvt/h];

T – Período de análise.

Na expressão 3.1, o período de análise é geralmente 15 minutos, pelo que $T=15/60=0,25$. Todavia, se a procura exceder a capacidade durante um período de tempo superior a 15 minutos, o atraso médio deve ser calculado para um período de análise superior ao período de saturação.

Desta forma, é possível obter o nível de serviço da interseção a partir do quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Nível de serviço de interseções não semaforizadas (SVC 2014)

Nível de Serviço	Atraso [seg]
A	<10
B	10-15
C	15-25
D	25-35
E	35-50
F	>50

Por outro lado, a qualidade das condições de funcionamento de um cruzamento (ou ramo de entrada) regulado por sinais luminosos, no qual todos os movimentos estão sujeitos a atrasos, pode ser avaliada com recurso ao indicador de desempenho atraso médio por veículo, cuja expressão de determinação para situações não saturadas pode ser a seguinte:

$$d = 0,9 \left[\frac{C(1 - \frac{g}{C})^2}{2(1 - x\frac{g}{C})} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} \right] \quad (3.2)$$

em que,

d – Atraso médio por veículo [seg];

C – Duração do ciclo [seg];

g – Tempo de verde útil [seg];

x – Grau de saturação [adimensional]

q – Débito de chegadas [uvl/h]

Desta forma, é possível obter o nível de serviço da interseção a partir do quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Nível de serviço de interseções semaforizadas (SVC 2014)

Nível de Serviço	Atraso médio [seg]
A	≤ 10
B	>10-20
C	>20-35
D	>35-55
E	>55-80
F	>80

Contudo, apesar dos avanços no estudo da qualidade de circulação das infraestruturas rodoviárias, é importante salientar que a determinação da velocidade em arcos congestionados é até hoje tema de discussão; o HCM não apresenta velocidade para o nível de serviço “F” (congestionamento), devido à instabilidade associada ao regime (TRB 2010, SVC 2014).

Para a simulação da redistribuição do tráfego numa rede congestionada é necessário um critério para a determinação da velocidade a ser considerada para os arcos cujo volume supere a capacidade da via, ou seja, que já encontrem-se em estado de congestionamento. Para tal, a formulação normalmente utilizada para a determinação do tempo despendido em viagem em condições de congestionamento é a proposta pelo BPR – *Bureau of Public Roads*, discutida na NCHRP 365 (Martin e McGuckin 1998) e apresentada na equação seguinte.

$$t_c = t_f [1 + \alpha(V/C)^\beta] \quad (3.3)$$

em que,

t_c – Tempo de percurso no arco em regime de congestionado [seg];

t_f – Tempo de percurso no arco em regime livre [seg];

V – Volume de tráfego no arco [uvl/h];

C – Capacidade do arco [uvl/h];

α, β – Coeficientes de calibração (geralmente $\alpha=0,15$ e $\beta=4,0$).

3.3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO COMPOSTOS

3.3.2.1. Indicador de Congestionamento

Desenvolvido por Zhang e Lomax no seu trabalho de 2007 (citado em Oliveira 2012), o indicador de congestionamento (*Congestion Index*, CI) pretende medir o nível de congestionamento de um arco de uma rede rodoviária. Desta forma, trata-se de um indicador que mede o desempenho de cada arco da rede de forma isolada, não preocupando-se com o desempenho da rede como um todo.

O CI é definido como a razão do tempo no arco em condições de circulação sobre o tempo no arco em regime livre, sendo a respetiva formulação matemática a seguinte:

$$CI = \frac{t_c}{t_f} = \frac{t_f + t_d \times [(1 - r)/100]}{t_f} \quad (3.4)$$

em que,

CI – Indicador de congestionamento [adimensional];

t_c – Tempo de percurso em regime de congestionamento [seg];

t_f – Tempo de percurso em regime livre [seg];

t_d – Atraso provocado pelo congestionamento [seg];

r – Redução do atraso (proporção) devido a medidas operacionais eventualmente impostas [%].

O tempo de percurso em condições de regime livre pode ser determinado a partir da expressão 3.5.

$$t_f = \frac{l}{s_f} \times 3,6 \quad (3.5)$$

em que,

t_f – Tempo de percurso em regime livre [seg];

l – Comprimento do arco [m];

s_f – Velocidade de percurso em regime livre [km/h].

Por seu lado, o tempo de viagem (percurso) em regime de congestionamento é determinado seguindo a expressão 3.6.

$$t_c = \frac{l}{s_c} \times 3,6 \quad (3.6)$$

em que,

t_c – Tempo de percurso em regime de congestionamento [seg];

l – Comprimento do arco [m];

s_c – Velocidade de percurso em regime de congestionamento [km/h].

A velocidade em condições de congestionamento pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$s_c = \frac{V}{\frac{1}{s_f} + \alpha \times e^{\beta \times (V/C)}} \quad (3.7)$$

em que,

s_c – Velocidade de percurso em regime de congestionamento [km/h];

s_f – Velocidade de percurso em regime livre [km/h];

V – Volume de tráfego no arco [uvl/h];

C – Capacidade do arco [uvl/h];

α, β – Coeficientes de calibração (geralmente, $\alpha=0,15$ e $\beta=4,0$).

Em relação ao atraso provocado pelo congestionamento, este engloba duas componentes: o atraso recorrente, t_r , e o atraso devido a incidentes, t_i , ambos determinados a partir das seguintes expressões:

$$t_d = t_r + t_i = (t_c - t_f) \times (1 + \theta) \quad (3.8)$$

$$t_r = t_c - t_f \quad (3.9)$$

$$t_i = (t_c - t_f) \times \theta \quad (3.10)$$

em que,

t_d – Atraso devido ao congestionamento [seg];

t_r – Atraso recorrente [seg];

t_c – Tempo de percurso em regime de congestionamento [seg];

t_f – Tempo de percurso em regime livre [seg];

t_i – Atraso devido a incidentes [seg];

θ – Fator associado a incidentes, indicando a probabilidade de ocorrência de incidentes na rede de transportes.

Como pode constatar-se, o indicador de congestionamento está intimamente ligado à razão volume/capacidade, visto o tempo de congestionamento utilizado neste indicador ser determinado a partir da expressão matemática 3.3, formulada por BPR (Bell 2000; Oliveira 2012; Zhang e Lomax 2007).

3.3.2.2. Indicador de Robustez da Rede

O indicador de robustez da rede (*Network Robustness Index*, NRI) surgiu na tentativa de determinar a importância de um arco em relação à rede que o contém, isto é, o NRI representa o custo da viagem associado a uma mudança de “caminhos” de todo o tráfego na rede caso algum arco fique indisponível (Scott et al 2006).

O bloqueio, temporário ou definitivo, de uma ligação pode provocar impactos económicos significativos, através do aumento nos tempos de percursos por caminhos alternativos, que, por sua vez, podem ficar sobrecarregados, principalmente se já operavam próximos à sua capacidade.

Para além disso, o NRI pode ser bastante útil na determinação de benefícios de manutenção ou reparação de vias específicas (Bell 2000; Chen et al. 2002; Scott et al 2006).

A formulação matemática deste indicador é a seguinte:

$$NRI_a = c_a - c \quad (3.11)$$

em que,

NRI_a – Indicador de robustez da rede para o arco a [uvl];

c_a – Custo das viagens em todo o sistema, após a remoção do arco a [uvl];

c – Custo das viagens em todo o sistema, com todos os arcos em funcionamento [uvl].

Os custos das viagens referidos anteriormente podem ser determinados pelas seguintes expressões:

$$c_a = \sum_a \frac{t_a V_a \delta_a}{3600} \quad (3.12)$$

$$c = \sum_a \frac{t_a V_a}{3600} \quad (3.13)$$

em que,

t_a – Tempo de viagem (percurso) no arco a [seg];

V_a – Volume de tráfego no arco a [uvl/h];

δ_i – Variável binária ($\delta=1$ se a não for o arco removido e $\delta=0$ caso contrário).

No lugar do custo do tempo de viagem, pode utilizar-se o custo generalizado do transporte, sendo que este último engloba todos os gastos que possam ser associados às viagens percorridas, como o custo de combustível, o custo de manutenção do veículo, o custo respeitante ao tempo despendido na viagem, entre outros.

Este indicador será tão mais representativo quanto maior for a exatidão dos tempos de viagem (Scott et al 2006).

3.3.2.3. Indicador de Robustez da Rede modificado

A determinação de indicadores que avaliam o desempenho de redes a partir da completa interrupção de um arco não é necessariamente realista no que diz respeito aos eventos quotidianos nas redes viárias. Propõe-se, assim, um novo indicador baseado no NRI que considere reduções na capacidade de um arco, em vez da sua completa interdição.

Desta forma, o indicador de robustez da rede modificado (*Modified Network Robustness Index*, NRI-m) permite obter informações para diferentes níveis de redução da capacidade.

A formulação matemática para o NRI-m é idêntica à formulação para determinar NRI, com a diferença que não existe a completa eliminação do arco, mas sim a redução da sua capacidade para um determinado nível previamente estabelecido (Jenelius, Petersen e Mattsson 2006; Sullivan et al 2010).

3.3.2.4. Indicador de Robustez de Viagens na Rede

O indicador de robustez de viagens na rede (*Network Trip Robustness*, NTR), tal como os dois anteriores, é um indicador de robustez ligado à rede, e não apenas a arcos individualizados, tendo como objetivo comparar redes rodoviárias de diferentes tipologias, permitindo a sua hierarquização.

Este indicador é calculado pelo somatório dos valores do NRI modificado de todos os arcos individuais de uma rede dividido pela procura total de viagens na rede. A razão de utilizar-se no denominador a procura total e não o número total de arcos da rede deve-se ao facto do tempo de viagem e o cálculo da redistribuição do tráfego serem dependentes do número de arcos, isto é, se a procura for considerada constante, redes com menor número de arcos tendem a ter custos de viagens superiores a redes com um maior número de arcos, o que distorceria o resultado. Desta forma, considera-se que a procura é um melhor parâmetro para o cálculo deste indicador (Sullivan et al. 2010).

A equação seguinte permite determinar este indicador:

$$NTR = \frac{\sum_{a \in A} NRI - m_a}{D_n} \times 3600 \quad (3.14)$$

em que,

NTR – Indicador de robustez de viagens em rede [seg];

$NRI - m_a$ – Indicador de robustez de rede modificado do arco a [uvl];

D_n – Número total de viagens na rede, ou procura total [uvl/h].

3.3.2.5. Indicador de Importância

Segundo Jenelius, Petersen e Mattsson (2006), o indicador de importância (II) tem por base a variação do custo total para uma rede caso haja interrupção de um ou mais arcos, o que obriga a que os utilizadores procurem alternativas, provocando um aumento no custo do transporte; salienta-se que o custo diz respeito ao tempo despendido a mais na viagem.

Este modelo admite que o utilizador dá preferência a rotas alternativas que minimizem o tempo de viagem, sendo este constante ao longo da rota entre cada par de origem e destino.

Desta forma, este indicador difere do NRI no sentido em que, enquanto o NRI considera que todas as rotas contribuem de igual forma para a rede como um todo e, conseqüentemente, o mesmo peso aquando da interrupção de uma delas, o II já tem em consideração a versatilidade de cada par origem/destino.

A expressão 3.15 permite determinar o indicador de importância.

$$II_a = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (t_{ij}^{(a)} - t_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, a \in A^{nd} \quad (3.15)$$

em que,

$I\!I_a$ – Indicador de importância do arco a [seg];

w_{ij} – Fator de peso que reflete a importância do par origem-destino (OD) ij em relação a outros pares OD;

t_{ij} – Tempo da viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com o arco a interrompido (a) [seg];

A^{nd} – Conjunto de todos os arcos que não provocam a desconexão da rede, ou seja, cuja interrupção não isola partes da rede, o que provocaria a impossibilidade de viagem para um grupo de pares OD e, portanto, um valor infinito para o indicador.

A interrupção de pelo menos um dos arcos pode dividir a rede em duas ou mais partes desconectadas, levando a que o tempo de viagem entre certos pares OD sejam infinitos. Para lidar com este problema, introduziu-se o conceito de Procura Insatisfeita, $vn_{ij}^{(a)}$, definida pela seguinte expressão:

$$vn_{ij}^{(a)} = \begin{cases} vt_{ij} & \text{se } t_{ij}^{(a)} = \infty \\ 0 & \text{se } t_{ij}^{(a)} < \infty \end{cases} \quad (3.16)$$

em que,

$vn_{ij}^{(a)}$ – Total de viagens entre i e j não realizadas devido à interrupção do arco a [uvl/h];

vt_{ij} – Procura de viagens entre i e j [uvl/h];

$t_{ij}^{(a)}$ – Tempo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do arco a [seg].

Assim, no caso de haver desconetividade da rede devido à interrupção de um dos arcos, o indicador de importância para procura insatisfeita é dado pela expressão 3.17.

$$I\!I^{ins}(a) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} vn_{ij}^{(a)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} vt_{ij}}, \quad a \in A \quad (3.17)$$

em que,

$I\!I^{ins}(a)$ – Indicador de importância do arco a , em caso de procura insatisfeita [adimensional];

$vn_{ij}^{(a)}$ – Total de viagens entre i e j não realizadas devido à interrupção do arco a [uvl/h];

vt_{ij} – Procura de viagens entre i e j [uvl/h];

A – Conjunto de todos os arcos da rede.

Por fim, este modelo ainda permite determinar a variação do tempo de viagem entre os pares de origem e destino a partir da seguinte expressão:

$$\Delta t_{ij}^{(a)} = t_{ij}^{(a)} - t_{ij}^{(0)} \quad (3.18)$$

em que,

$\Delta t_{ij}^{(a)}$ – Variação no tempo de viagem entre i e j decorrente da interrupção do arco a [seg];

$t_{ij}^{(a)}$ – Tempo de viagem entre i e j devido à interrupção do arco a [seg];

$t_{ij}^{(0)}$ – Tempo de viagem entre i e j com toda a rede íntegra [seg].

Para efeitos de aplicação deste modelo, a procura é considerada inelástica à variação do tempo de viagem, isto é, a interrupção de um ou mais arcos tem duração suficiente para que haja uma nova relação de equilíbrio de rotas na rede, mas insuficiente para que haja reflexo na procura (esta não se altera).

3.3.2.6. Indicador de Exposição

O indicador de exposição (IE), também proposto por Jenelius, Petersen e Mattsson (2006), difere do II na medida em que procura avaliar um grupo de nós, ou uma região, quanto à sua exposição ou vulnerabilidade a um acontecimento capaz de interromper, por completo, a fluidez do tráfego em determinado arco.

A expressão 3.19 apresenta o indicador médio de exposição (IE) a um acontecimento aleatório num arco, também ele aleatório.

$$IE(m) = \frac{\sum_{a \in A^{nd}} \sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (t_{ij}^{(a)} - t_{ij}^{(0)})}{L^{nd} \sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (3.19)$$

em que,

$IE(m)$ – Indicador de exposição da região m a um acontecimento aleatório [seg];

A^{nd} – Conjunto de arcos que não provocam a desconexão da rede, isto é, cuja interrupção não isola partes da rede, o que impossibilitaria viagens para um grupo de pares OD, ficando o indicador com valor infinito;

N_m^d – Conjunto de nós pertencentes à região m;

w_{ij} – Fator de peso que reflete a importância do par OD_{ij} em relação aos outros pares OD;

t_{ij} – Tempo da viagem entre i e j com toda a rede funcional (0) e com um elemento (a) interrompido [seg];

L^{nd} – Número de arcos que não provocam a desconexão da rede.

Analisando a equação anterior conclui-se que é calculada uma média entre as variações de custo provocadas pela interrupção de um arco.

Assim sendo, também é possível determinar o indicador de exposição correspondente à interrupção do arco de maior importância:

$$IE_{max}(m) = \max_{a \in A^{nd}} \frac{\sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (t_{ij}^{(a)} - t_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in N_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (3.20)$$

Desta forma, o indicador de exposição pode ser determinado segundo a variação de tempos de viagem que a interrupção de um arco provocaria sobre uma determinada região da rede, ou sobre toda a rede de transporte.

3.3.2.7. Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento

Segundo Safirova, Gillingham e Houde (2007), o custo marginal é o custo imposto ao sistema devido ao incremento de uma unidade de tráfego (débito*distância). A metodologia adotada pretende determinar o acréscimo do tempo total de uma rede derivado do acréscimo de uma unidade de débito*distância; desta forma, considerando-se um valor para o tempo, o indicador de custo marginal sob congestionamento (ICMC) representaria o valor monetário por unidade de distância.

Usualmente, é utilizado o custo médio de transporte, de forma que ignora-se o efeito que um utilizador impõe aos demais em vias congestionadas.

Desta forma, este modelo considera a repercussão dos efeitos do congestionamento por toda a rede de transporte. Para tal, a procura em cada par OD é aumentada na mesma relação percentual, sendo realizada uma nova redistribuição de viagens à rede. Isto é, todas as células da matriz OD da rede são multiplicadas pelo mesmo fator e, conseqüentemente, há uma variação nas velocidades e no débito*distância em cada arco, o que implica um tempo adicional ao tempo de viagem.

Assim, o ICMC pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$ICMC_a = \left(\frac{1}{s_{a1}} - \frac{1}{s_{a0}} \right) \times \frac{fl_{a0} + fl_{a1}}{2} \times ct_a \times \frac{1}{fl_{a1} - fl_{a0}} \quad (3.21)$$

em que,

$ICMC_a$ – Custo marginal de congestionamento por unidade de distância num arco a [€/km];

s_{a0} e s_{a1} – Velocidades, no arco a, antes e depois do aumento no produto débito*distância respetivamente [km/h];

fl_{a0} e fl_{a1} – Débito*distância inicial e final, respetivamente, no arco a [uvl/h*km];

ct_a – Valor médio do tempo consumido no arco a [€/h].

3.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS INDICADORES DE DESEMPENHO

3.4.1. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

A análise dos indicadores propostos pelos diferentes autores e os critérios adotados para a sua determinação permitiu a identificação de elementos, pertinentes para uma avaliação mais analítica de cada indicador.

Assim, segundo Oliveira (2012), os elementos de avaliação dos indicadores são:

- a. Congestionamento;
- b. Confiabilidade;
- c. Vulnerabilidade;
- d. Risco;
- e. Flexibilidade;
- f. Abrangência;
- g. Dificuldade de determinação.

Tendo em conta que o congestionamento é um dos principais fatores ligados à fluidez do tráfego, é importante classificar os indicadores levantados quanto à forma como é considerado o congestionamento na sua determinação. Em alguns casos, limitam-se a apresentar formas de quantificação do nível de congestionamento de um arco considerando o valor como o indicador de desempenho desse arco. Outros indicadores são influenciados pelo nível de congestionamento de um arco específico ou da rede viária como um todo, mas esse nível de congestionamento não se traduz diretamente num indicador de desempenho. Para a classificação dos indicadores de desempenho foram considerados dois níveis quanto ao tratamento do congestionamento:

- Direto – o nível de congestionamento de um arco é o principal aspeto considerado;
- Indireto – o nível de congestionamento de um arco, ou de um conjunto de arcos, influencia a sua determinação de forma indireta, mas o desempenho do arco não guarda necessariamente relação direta com este nível de congestionamento.

A confiabilidade refere-se à confiança que os utilizadores têm quanto ao desempenho satisfatório da rede de transportes. A dimensão mais valorizada pelo utilizador é normalmente o tempo de viagem e, portanto, a confiabilidade está fortemente associada à previsibilidade do tempo de viagem numa rede (Bates et al. 2001; Bell 2000; Oliveira 2012).

Os indicadores de desempenho referidos relacionam-se todos com a fluidez do tráfego, e a fluidez do tráfego influencia o tempo de viagem. Uma vez que o principal parâmetro associado à confiabilidade é tempo de viagem, todos os indicadores referidos têm, de alguma forma, em conta esse aspeto. Para efeito comparativo, classificou-se os indicadores de desempenho quanto à sua capacidade de representar o nível de confiabilidade na rede de transportes em dois níveis:

- Direto – o indicador encontra-se diretamente relacionado com a confiabilidade da rede;
- Indireto – o indicador guarda pouca relação com o conceito de confiabilidade da rede.

Em relação à vulnerabilidade, Berdica (2002), Jenelius, Petersen e Mattson (2006), Jenelius e Mattson (2012) e Nicholson (2003) definem-na como o grau de dependência que rede transportes tem em relação ao desempenho de um arco ou conjunto de arcos. Uma rede seria mais vulnerável quando a degradação do desempenho de pelo menos um dos seus arcos implicasse consequências negativas para o desempenho dessa rede. Dentro dos indicadores de desempenho levantados, a maioria reflete, de alguma forma, a vulnerabilidade da rede de transportes. Para efeito comparativo, os indicadores de desempenho foram classificadas em três níveis:

- Direto – o indicador encontra-se diretamente relacionado à vulnerabilidade da rede;
- Indireto – o indicador está relacionado de forma indireta à vulnerabilidade da rede, isto é, está associado ao grau de vulnerabilidade da rede, embora não seja esse a sua principal preocupação;
- Indiferente – o indicador não está associado à vulnerabilidade da rede, ou seja, não reflete a maior ou menor vulnerabilidade da rede de transportes.

O aspeto risco assemelha-se à vulnerabilidade; todavia, a sua avaliação exige a estimativa da probabilidade de ocorrência de acontecimentos e as suas consequências inerentes. Alguns autores, como Erath et al. (2009), não diferem entre risco e vulnerabilidade. À semelhança da classificação utilizada para a propriedade vulnerabilidade, os indicadores de desempenho foram classificados em três níveis:

- Direto – o indicador encontra-se diretamente relacionado ao risco da rede;
- Indireto – o indicador está relacionado de forma indireta ao risco da rede, isto é, está associado ao grau de risco da rede, embora não seja esse a sua principal preocupação;
- Indiferente – o indicador não está associado ao risco da rede, ou seja, não reflete o maior ou menor risco da rede de transportes.

A flexibilidade de uma rede define-se como a facilidade que esta tem em ajustar-se a mudanças nas circunstâncias e na procura, seja nas operações ou na própria infraestrutura. Usualmente está associada ao grau de conectividade entre os elementos constituintes da rede e ao número de rotas alternativas para todos os pares de origem e destino.

À semelhança da classificação utilizada para os atributos vulnerabilidade e risco, os indicadores de desempenho são classificados em relação à flexibilidade em três níveis:

- Direto – o indicador encontra-se diretamente relacionado à flexibilidade da rede;
- Indireto – o indicador está relacionado de forma indireta à flexibilidade da rede, isto é, está associado ao grau de flexibilidade da rede, embora não seja esse a sua principal preocupação;
- Indiferente – o indicador não está associado à flexibilidade da rede, ou seja, não reflete a maior ou menor flexibilidade da rede de transportes (Berdica 2002; Feitelson e Salomon 2000; Nicholson 2003; Oliveira 2012).

A propriedade abrangência refere-se à dimensão espacial considerada pelo indicador de desempenho analisado. Foram identificadas três dimensões principais:

- Arco – o indicador restringe-se ao desempenho do arco, sem avaliar a influência que esse arco tem nos restantes elementos da rede;
- Região – o indicador não restringe-se a um arco mas sim a um grupo de arcos ou nós, que definem uma região, subconjunto da rede viária;
- Rede – o indicador tem como finalidade principal verificar a importância de um determinado arco ou grupo de arco no desempenho da rede como um todo.

Para a utilização de um indicador de desempenho, é necessário que a sua determinação seja exequível, ou seja, deve ser conhecida e sistematizável, tendo como base parâmetros existentes numa base de dados com as características dos arcos que compõem a rede viária. É também importante que os custos envolvidos, tanto monetários como de tempo despendido, estejam dentro dos recursos disponíveis. Por exemplo, um processo muito demorado para a determinação de indicadores pode reduzir a análise de cenários alternativos, o que compromete a qualidade do estudo, ainda que a metodologia utilizada seja de grande exatidão.

Desta forma, é desejável que o processo de determinação dos indicadores seja tanto quanto possível simples, sistematizável, rápida e de baixo custo. Assim, para o aspecto dificuldade de determinação foram criadas três classificações:

- Dificuldade Baixa – determinação simples, sistematizável, rápida e de baixo custo;
- Dificuldade Média – dificuldade intermediária entre a Baixa e a Alta;
- Dificuldade Alta – determinação exige recursos computacionais elevados e/ou análise individual personalizada e/ou tempo expressivo para sua obtenção.

Como critério para a classificação em nível de dificuldade, foram consideradas como de baixa dificuldade as metodologias de determinação que pudessem ser incorporadas diretamente em modelos de análise de redes disponíveis no mercado, como por exemplo o TransCAD, sem a necessidade de programação especializada. A dificuldade média corresponderia a algum esforço de programação ou de preparação de dados mais personalizada. A dificuldade alta, por sua vez, envolveria um tratamento individual por ligação, programação extensiva personalizada e/ou tempo de processamento de dados considerado como excessivo (Oliveira 2012).

3.4.2. AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO E RESPETIVOS INDICADORES

3.4.2.1. Nível de Serviço e rácio Volume/Capacidade

Os diferentes indicadores associados à medida de desempenho Nível de Serviço avaliam os diferentes elementos de uma infraestrutura rodoviária quanto ao nível de serviço, ou qualidade de serviço, oferecido aos utilizadores, não tendo como objetivo a hierarquização de arcos numa rede viária, mas sim a sua classificação quanto à utilização da capacidade de escoamento de tráfego, pelo que conclui-se que o NS está relacionado com o desempenho de um elemento da rede e não com o desempenho da rede como um todo.

Estando o nível de serviço F associado a situações de congestionamento, a velocidade nesses ramos é difícil de prever, logo quanto maior a quantidade de arcos com NS F menor a confiabilidade da rede de transportes, uma vez que a estimativa dos tempos de viagem (variável indispensável da definição do NS) ficará mais comprometida. No entanto, os indicadores caracterizadores do NS não têm como finalidade verificar a maior ou menor confiabilidade da rede, para além de, também, não preocuparem-se em avaliar os atributos vulnerabilidade, risco ou flexibilidade.

A metodologia de determinação de NS, apesar de consolidada, é complexa e de difícil determinação sistemática exigindo a análise individual de cada arco. É comum a simplificação que envolve a determinação da capacidade para nível de serviço E, com base em parâmetros constantes num modelo representativo de uma rede viária, tais como, número de vias e inclinação da via. Desta forma, esta medida de desempenho apresenta-se com uma dificuldade alta para hierarquização ao nível do desempenho dos arcos da rede viária.

Por outro lado, o Volume/Capacidade pode ser determinado de forma sistemática, pelo que pode ser utilizado para hierarquização dos arcos como um substituto do Nível de Serviço, uma vez que quanto maior a relação V/C, mais o nível de serviço aproxima-se de F; para além disso, apresenta a vantagem de não encontrar-se restringido a seis classificações. Por essa razão, se o NS apresenta dificuldade alta na hierarquização de arcos numa rede, a relação V/C apresenta dificuldade baixa no mesmo parâmetro de estudo.

Contudo, o parâmetro dificuldade é o único em que NS e V/C diferem; nas restantes características em análise, os indicadores respeitantes ao Nível de Serviço e a relação Volume/Capacidade encontram-se em concordância (Oliveira 2012; TRB 2010).

3.4.2.2. Indicador de congestionamento

A determinação do CI está restrita à análise de arcos isolados, sem a verificação do impacto que estes têm no desempenho da rede em que estão inseridos. Como o próprio nome sugere, o indicador está diretamente ligado ao nível de congestionamento do arco em análise. Assim como no caso do NS, o CI guarda uma relação indireta com o atributo confiabilidade. Quanto maior este indicador, menor a confiabilidade da rede de transportes, uma vez que a previsibilidade dos tempos de viagem ficará cada vez mais comprometida, não sendo, no entanto, esta propriedade um objetivo deste indicador. Observe-se que também não há qualquer preocupação em avaliar os atributos vulnerabilidade, risco ou flexibilidade (Oliveira 2012; Zhang e Lomax 2007).

3.4.2.3. Indicador de Robustez da Rede

O NRI representa o consumo do tempo de viagem resultante da interrupção de um arco da rede viária, sendo assim, um indicador que classifica a importância de um arco para o desempenho da rede na qual ele se insere. Igualmente, está indiretamente ligado ao nível de congestionamento, uma vez que um arco sob congestionamento tem grande probabilidade de ser uma ligação importante dentro da rede viária. Contudo, o indicador não mede o nível de congestionamento de um arco ou da rede viária.

Este indicador está diretamente ligado ao atributo vulnerabilidade, uma vez que uma rede mais vulnerável tende a ter seu desempenho mais degradado com a interrupção de um dos seus arcos, apresentando NRI maiores para os ramos que a compõem. Estando também diretamente relacionado com a capacidade de reorganização do tráfego, em função da interrupção de uma ligação, interliga-se diretamente ao aspeto flexibilidade.

Quanto aos atributos confiabilidade e risco há uma relação indireta, sendo que a falha numa ligação encontra-se associada ao conceito de risco e a variação nos tempos de viagem inerentes a essa falha está associada à confiabilidade da rede.

Por fim, a determinação sistemática do NRI para todos os arcos numa rede é um procedimento de dificuldade alta, dada a necessidade de programação específica e o tempo envolvido, que pode ser expressivo. Numa rede pouco complexa, a dificuldade de utilização do NRI como indicador pode ser considerada baixa, devido à simplicidade da metodologia envolvida na sua determinação (Oliveira 2012; Scott et al. 2006).

3.4.2.4. Indicador de Robustez da Rede-modificado

A avaliação do NRI-m quanto aos atributos é praticamente coincidente com a do NRI. Em termos de dificuldade, envolve mais trabalho para sua determinação do que o NRI, já que, idealmente, deveriam ser observados diversos níveis de redução de capacidade para cada arco para uma análise mais detalhada. O procedimento é simples, mas exige intensos recursos computacionais e tempo. Assim, quanto à dificuldade, o indicador é classificado como de dificuldade alta (Oliveira 2012; Sullivan et al. 2010).

3.4.2.5. Indicador de Robustez de Viagens em Rede

O NTR trata-se de um indicador ligado ao desempenho da rede, desenvolvido para comparação entre redes e partes da rede, independentemente da sua topologia e porte. Não é um indicador para hierarquização de arcos, ao nível do seu desempenho, numa rede viária, mas pode ser utilizado para hierarquização de sub-redes, ou grupos de arcos, inseridos numa rede, de forma a detetar quais as regiões mais críticas.

Portanto, apresenta-se como um indicador ligado diretamente ao desempenho da rede, sem individualização por ramo. Por outro lado, leva indiretamente em conta o congestionamento e os problemas associados a este, o que influencia os tempos totais de viagem cada vez que a capacidade de um arco é reduzida.

Sendo um indicador global de rede, que avalia a variação nos tempos de todos os arcos em função de reduções de capacidade em cada um de seus ramos, está diretamente ligado ao atributo confiabilidade. Para além disso, como a variação dos tempos globais entre os pares de origem e destino está ligada à disponibilidade de rotas alternativas, o indicador encontra-se diretamente ligado ao atributo flexibilidade. É um bom indicador também para vulnerabilidade já que permite verificar a perda de desempenho da rede face a acontecimentos que degradem o desempenho de cada um dos seus arcos. Quanto ao atributo risco, pode-se afirmar que está relacionado indiretamente, uma vez que não contempla a probabilidade de ocorrência dos acontecimentos que impõem a redução de capacidade nos seus ramos.

Sendo o NTR determinado a partir do somatório dos valores de NRI-m de cada um dos ramos que compõem uma rede viária, a sua determinação é de dificuldade alta, dado o tempo e recursos de processamento necessários (Oliveira 2012; Sullivan et al. 2010).

3.4.2.6. Indicador de Importância

Trata-se de um indicador semelhante ao NRI, visto avaliar o desempenho da rede rodoviária a partir da desconexão de um de seus arcos. O indicador de importância de cada arco depende do impacto nos custos globais de transporte causado pela sua desunião da rede.

Difere do NRI na medida em que utiliza um fator ponderador, usualmente a procura, de forma a obter um valor médio para cada arco. Quanto aos atributos utilizados para a comparação entre os indicadores sob análise, comporta-se exatamente como o NRI (Jenelius, Peterson e Mattsson 2006; Oliveira 2012).

3.4.2.7. Indicador de Exposição

Apresenta-se com um indicador semelhante ao II, diferindo deste último no sentido em que avalia um grupo de nós, ou uma região, quanto à sua vulnerabilidade a um evento capaz de interromper a circulação do tráfego num determinado arco.

Quanto ao aspeto abrangência é, portanto, focado em regiões, mas leva em consideração o impacto que tem nos restantes elementos da rede. Para além disso, o eventual congestionamento de um ou mais arcos tem influência na determinação do IE de forma indireta, tendo em conta que aumenta o custo global inerente à viagem. Por outro lado, os atributos vulnerabilidade e flexibilidade são considerados de forma direta, na medida em que o indicador é tanto maior quanto maior for a vulnerabilidade e menor a flexibilidade da rede; já a confiabilidade da rede é considerada de forma indireta, visto que

uma rede mais vulnerável e menos flexível está geralmente associada a uma estimativa menos previsível dos seus tempos de viagem, ou seja, uma rede mais vulnerável a ocorrências capazes de interromper um de seus ramos apresenta certamente um risco maior. Como o IE não trata a probabilidade de ocorrência dos eventos desconectores, considera-se que o atributo risco é considerado de forma indireta.

Por fim, a determinação deste indicador apresenta uma dificuldade extra em relação à do II para cada um de seus arcos, já que envolve a subdivisão da rede em regiões e seu georreferenciamento (Jenelius, Peterson e Mattsson 2006; Oliveira 2012).

3.4.2.8. Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento

O ICMC é determinado com base no acréscimo de custo do tempo de viagem numa rede a partir do aumento de uma unidade de tráfego, que, por sua vez, tem impacto no congestionamento, e, conseqüentemente, nos custos de transporte. A importância de cada arco pode ser avaliada sob a perspectiva do impacto no custo decorrente do aumento marginal do nível de congestionamento.

O ICMC avalia o desempenho no contexto da rede, e não de arcos isolados, e consiste num indicador diretamente ligado ao nível de congestionamento de cada arco. Tendo em consideração que a variação do custo de transporte encontra-se em função do nível de congestionamento e diretamente ligada à variação no tempo de viagem, o atributo confiabilidade está diretamente relacionado ao ICMC.

O atributo flexibilidade é contemplado no indicador, já que a existência de rotas alternativas diminuiria o impacto sobre a rede no aumento marginal de um de seus arcos.

A dificuldade de determinação do ICMC pode ser considerada baixa, isto é, de fácil sistematização com a utilização de programas de cálculo automático de tratamento de rede disponíveis no mercado. Por sua vez, os atributos vulnerabilidade e risco não são contemplados por este indicador (Oliveira 2012; Safirova, Gillingham e Houde 2007).

3.4.2.9. Síntese

Com base nos atributos anteriormente referidos, apresenta-se no quadro 3.4 uma síntese da classificação apresentada que permite uma melhor visualização e comparação dos diferentes indicadores de desempenho.

Quadro 3.4 – Comparação entre os indicadores estudados e os atributos considerados (Adaptado de Oliveira 2012)

Atributos	Indicadores de desempenho								
	NS	V/C	CI	NRI	NRI-m	NTR	II	IE	ICMC
Congestionamento	Direto	Direto	Direto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Direto
Confiabilidade	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Direto	Direto	Indireto	Indireto	Direto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Indiferente
Risco	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indireto	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto
Abrangência	Arco	Arco	Arco	Rede	Rede	Região/ Rede	Rede	Região/ Rede	Rede
Dificuldade	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Baixo

4

Caso Prático

4.1. DESCRIÇÃO E OBJETIVOS

O objetivo principal deste capítulo consiste em definir uma metodologia para o tratamento de dados de tráfego recolhidos por um Sistema Centralizado de Controlo de Tráfego, de modo a ser possível, de uma forma sistemática, calcular um conjunto de indicadores que permitam a caracterização das condições de circulação de um meio urbano.

O tratamento de dados é indispensável na análise de quaisquer dados recolhidos em campo. Isto deve-se ao facto de que os sensores de recolha de dados brutos, independentemente da tecnologia inerente a estes, são altamente suscetíveis, isto é, pode haver falta de dados ou erros de medição devidos a interferências eletrónicas ou a falhas de funcionamento. Dados com baixa qualidade e confiabilidade conduzem a uma fraca qualidade de processamento e análise de resultados.

Por sua vez, o cálculo de indicadores a partir do tratamento de dados obtidos permitem ao utilizador dos sistemas referidos anteriormente uma perceção mais realista e simplificada da mobilidade existente na área em análise.

Para tal, teve-se como base para o desenvolvimento deste estudo os dados do sistema centralizado da cidade do Porto, mais precisamente os dados referentes ao ano civil de 2013.

Todavia, devido à complexidade e tempo despendido no tratamento de dados para um ano inteiro, decidiu-se, para o caso prático em estudo, apenas estudar os dados brutos relativos a um mês. Para decidir-se qual seria o mês-padrão foi necessário ter em consideração fatores que possam provocar irregularidades no tráfego, tais como festas populares ou férias. Assim, escolheu-se tratar os dados do mês de Novembro, por ter apenas um fator anómalo, o feriado no dia 1 de Novembro, que, por ser um dia atípico, não é considerado no tratamento e análise de dados.

Em relação aos dados, estes foram disponibilizados pela Câmara Municipal do Porto e dizem respeito a 10 zonas diferentes ao longo de toda a cidade, sendo que em cada zona existem diversos contadores que registam o número de veículos que passam a cada 5 minutos ao longo de todo o dia.



Figura 4.1 – Rede da Cidade do Porto com zonas em análise delimitadas

As zonas cujos dados foram tratados encontram-se denominadas das seguintes formas:

- a. Zona 1: Sé;
- b. Zona 2: Bolhão;
- c. Zona 3: República;
- d. Zona 4: Boavista;
- e. Zona 5: Galiza;
- f. Zona 6: Universidade;
- g. Zona 7: Magalhães;
- h. Zona 8: Mota Pinto;
- i. Zona 9: Constituição;
- j. Zona 10: Parque da Cidade.

4.2. METODOLOGIA ABORDADA

4.2.1. TRATAMENTO DE DADOS

Como já foi referido, os dados disponibilizados apresentam-se em volumes de tráfego para períodos de 5 minutos. Porém, uma análise nestas dimensões torna-se bastante complexa devido à discrepância entre todos os valores e à difícil deteção dos possíveis erros. Assim sendo, para uma análise mais expedita, considerou-se benéfico analisar os volumes de tráfego para períodos de 15 minutos, período usualmente utilizado para a avaliação das condições de circulação.

Em relação ao tratamento dos dados, foi imperativo uma eliminação inicial de dias, em cada contador, cujos dados em falta sejam considerados excessivos e, por isso, não devam ser considerados para análise, uma vez que a sua “reconstituição” não seria válida. Assim, tendo por base Lopes (2011), sempre que há dados nulos num intervalo superior a 120 minutos, o respetivo dia não deve ser considerado na análise e, conseqüentemente, nas fases seguintes de tratamento de dados. No entanto, como existem períodos horários em que, apesar de improvável, não é impossível que este acontecimento ocorra, adaptou-se este parâmetro e eliminou-se apenas quando este intervalo de lapso de dados ocorra entre as 6h e as 22h.

Posteriormente, procedeu-se à deteção e correção dos “outliers” dos contadores. Os denominados “outliers” referem-se a valores que diferem muito dos restantes dados homólogos¹. Estes podem ocorrer devido a interferências eletrónicas, instabilidade no processo de recolha dos dados, degradação do equipamento, falhas no sistema de computação ou comunicação. Adicionalmente, a sua ocorrência pode influenciar os dados brutos seguintes, daí a importância em identificar e corrigir estes valores atípicos.

Assim, para identificar os “outliers” foi utilizado o trabalho desenvolvido por Tavares (2004), no qual apresenta-se o parâmetro empírico GEH, embora seja de referir num diferente contexto, sendo que considera-se como valores atípicos aqueles cujo parâmetro seja igual ou superior a 10.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(x_i - \bar{x})^2}{x_i + \bar{x}}} \quad (4.1)$$

em que,

x_i – Volume de tráfego correspondente ao tempo t [veic/15min];

\bar{x} – Volume de tráfego médio correspondente ao tempo t, para os dias homólogos [veic/15min].

Já com os “outliers” identificados, procedeu-se à sua correção utilizando o método referido em Lopes (2011) para dados em falta (*missing values*); considera-se os valores atípicos como dados em falta (valores nulos), pois apesar de não serem verdadeiramente nulos são igualmente incorretos, pelo que podem ser corrigidos de forma idêntica.

Lopes (2011) sugere que qualquer amostra pode ser substituída tendo em consideração uma população equivalente, desde que esta última contenha informação útil e consistente para prever os dados em falta; desta forma, conclui-se que não é proveitoso corrigir os valores quando a população homóloga encontra-se também incorreta.

Assim, para “outliers” isolados, isto é, para valores atípicos correspondentes a períodos de 15 minutos, utilizou-se a expressão 4.2 para os corrigir.

$$v_d = w_0 + w_1 t \quad (4.2)$$

em que,

v_d – Valor do “outlier” a corrigir correspondente ao tempo t [veic/15min];

w_0, w_1 – Coeficientes de regressão;

t – Tempo t.

¹ Subdividiu-se os dados em 3 grupos: dias úteis, sábados e domingos. Desta forma, considera-se que todos os valores correspondentes aos dias úteis são dados homólogos; o mesmo acontece para os outros 2 grupos.

$$w_1 = \frac{\sum_{i=1} (t_i - \bar{t})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1} (t_i - \bar{t})^2} \quad (4.3)$$

$$w_o = \bar{v} - w_1 \bar{t} \quad (4.4)$$

em que, \bar{v} e \bar{t} correspondem à média dos 3 dados e tempos anteriores ao do valor do “outlier”, respetivamente.

Por outro lado, quando os “outliers” identificados encontram-se agrupados em períodos superiores a 15 minutos, recorre-se à expressão 4.5 para corrigi-los.

$$v_d = \frac{v_d(t-1)}{v_{rd}(t-1)} \times v_{rd}(t) \quad (4.5)$$

em que,

v_d – Valor do “outlier” a corrigir correspondente ao tempo t [veic/15min];

$v_d(t-1)$ – Valor correspondente ao dia de v_d para o tempo t-1 [veic/15min];

$v_{rd}(t)$ – Valor médio dos restantes dias homólogos ao do “outlier” para o tempo t [veic/15min];

$v_{rd}(t-1)$ – Valor homólogo ao $v_{rd}(t)$, incluindo o dia correspondente ao “outlier” [veic/15min].

Porém, as expressões de Lopes (2011) permitem apenas corrigir valores que possuam dados admissíveis como referência em períodos horários anteriores, não podendo-se utilizá-las quando os “outliers” encontram-se nos primeiros 15 minutos do dia (das 00:00 às 00:15). Assim, para corrigir os valores irregulares neste período, decidi adotar-se a média dos restantes valores homólogos. Observe-se no entanto, que este facto poderia ser ultrapassado se se considerasse uma série contínua, mas que por simplificação tal não foi realizado.

Após correção dos valores atípicos, ainda foi necessário identificar e corrigir valores nulos situados entre as 6h e as 22h; para tal, procedeu-se de forma análoga à utilizada para os “outliers”, sendo, por isso, utilizadas novamente as expressões 4.2 a 4.5.

Todavia, ainda é possível a existência de valores incorretos, não nulos, que não podem ser identificados pelo parâmetro GEH. Para uma deteção mais fácil destes, recorreu-se a gráficos, ou seja, foram construídos 3 gráficos (dias úteis, sábados e domingos) para cada contador e zona a analisar. Depois, estudou-se cada gráfico, e tendo em conta a localização geográfica, o horário e o dia da semana em causa, considerou-se ou não se algum dos valores apresentados se encontrava muito distanciado dos restantes valores homólogos; se o valor foi considerado anómalo, procedeu-se à sua correção através de uma simples previsão, pelo método linear, tendo em consideração os 3 valores anteriores do mesmo dia da semana.

Desta forma, foi possível obter dados mais prováveis a serem utilizados posteriormente na determinação de indicadores de desempenho para posterior hierarquização da rede viária ao nível do desempenho dos seus arcos constituintes. Para termos exemplificativos, as figuras 4.2. e 4.3. representam o perfil temporal, para todos os dias úteis do mês de Novembro de 2013, de todos os veículos contados pelo contador 2 na zona 9, antes e depois do processo de tratamento de dados brutos.

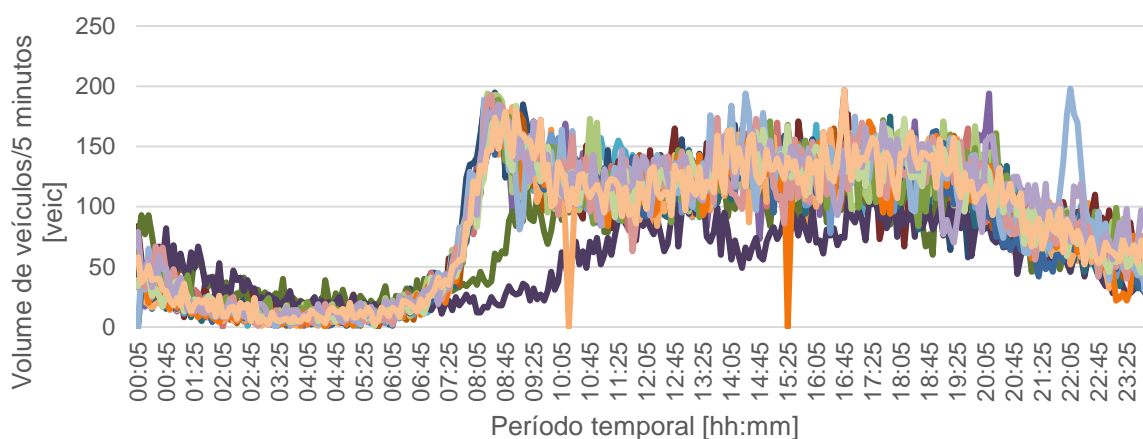


Figura 4.2 – Perfil Temporal dos dias úteis Volume vs. Contador 2 da zona 9 – Antes do tratamento de dados

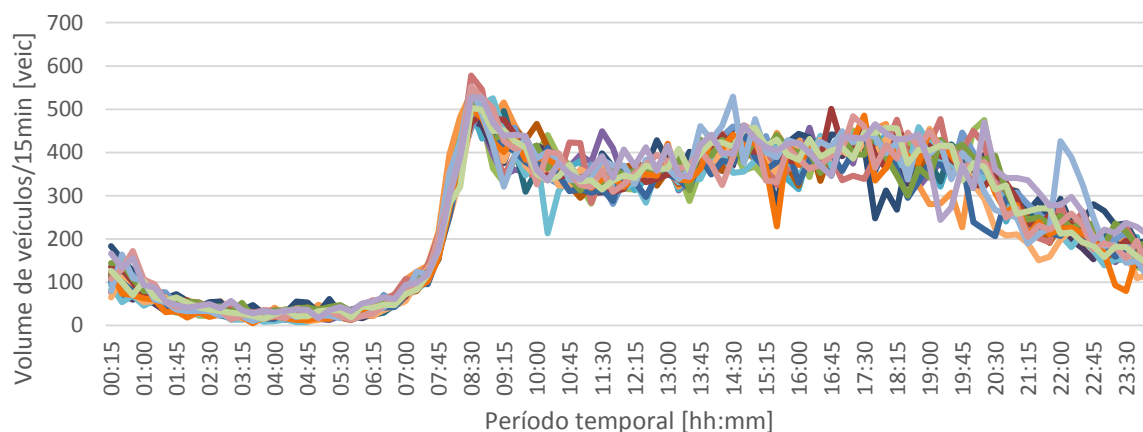


Figura 4.3 – Perfil Temporal dos dias úteis Volume vs. Contador 2 da zona 9 – Depois do tratamento de dados

4.2.2. CÁLCULO DE INDICADORES ATRAVÉS DO MODELO SATURN

O modelo SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Network*), desenvolvido pelo *Institute for Transport Studies*, na Universidade de Leeds, em 1982, consiste num conjunto de programas e destina-se à análise de redes viárias, sendo possível calcular a partir deste modelo as variáveis de tráfego que permitem, de uma forma indireta, a determinação de indicadores de desempenho e, consequentemente, a hierarquização dos arcos no que se refere ao seu desempenho.

Todavia, apesar deste modelo trazer inúmeras vantagens para o estudo de tráfego em meio urbano, também acarreta algum esforço adicional. Assim, devido ao tempo limitado disponível, optou-se por apenas estudar uma das dez zonas em análise na cidade do Porto, sendo que a zona escolhida foi a zona 9, correspondente à Constituição. Na figura seguinte, apresenta-se a zona a modelar, assim como os contadores existentes nessa mesma área de estudo.

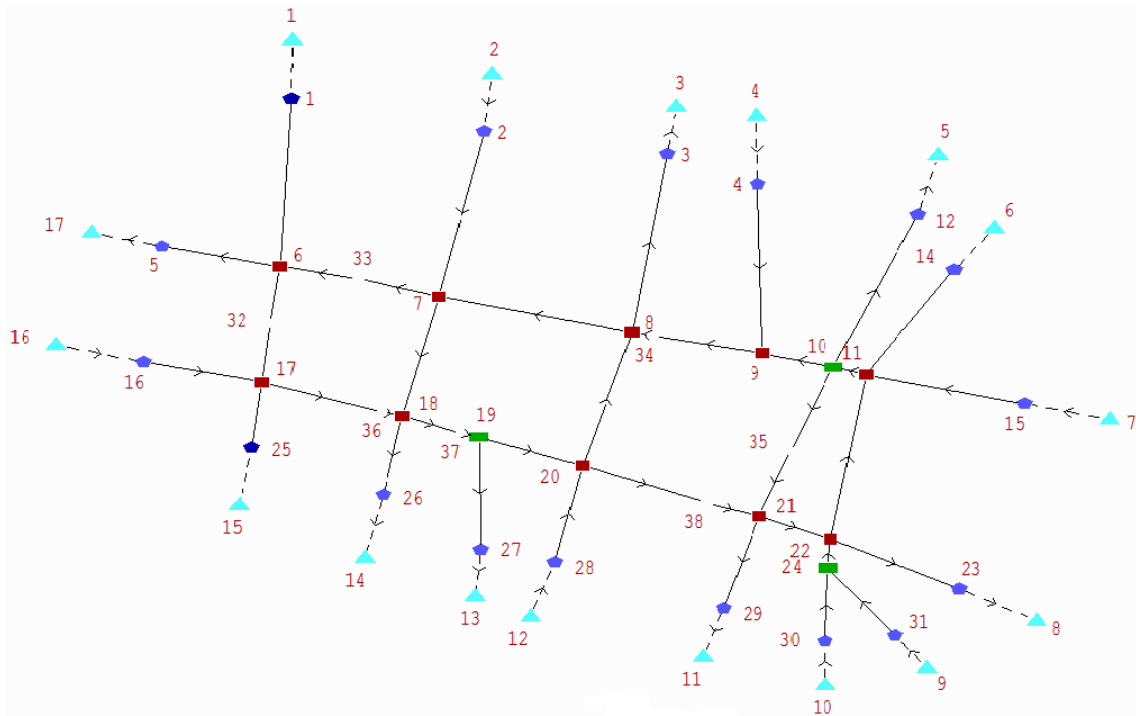


Figura 4.5 – Rede rodoviária modelada da zona da Constituição

Ao analisar a figura 4.5, constata-se que a maior parte dos nós corresponde a interseções semaforizadas, sendo que apenas os nós 11, 19 e 24 dizem respeito a interseções prioritárias. Ainda é importante evidenciar que devido à existência descontínua de vias exclusivas para autocarros e existência de mudanças de número de vias em certos arcos, foi necessário recorrer-se a nós fictícios para a representação destas alterações (nós 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38).

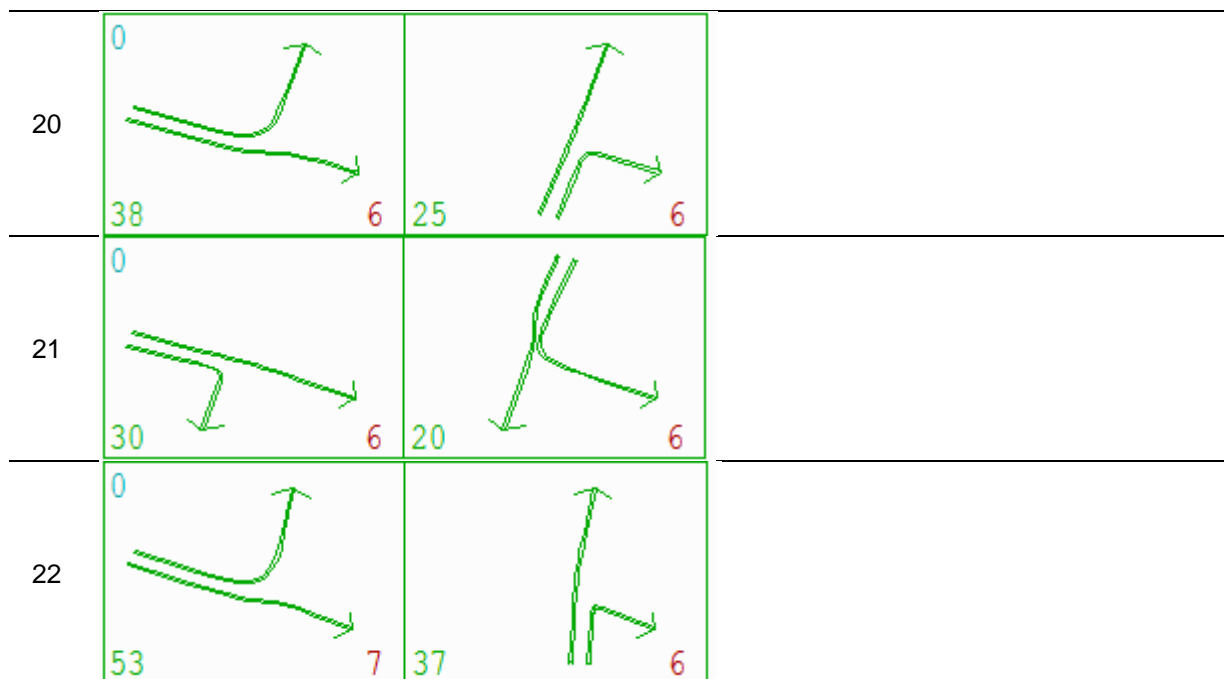
Para além disso, ainda necessitou-se de pré-definir débitos de saturação para todos os nós, incluindo os fictícios. Assim, tendo em consideração Tavares (2014), considerou-se os seguintes débitos de saturação:

- a. Movimento em frente: 1800 veic/h/via;
- b. Viragem à esquerda: 1700 veic/h/via;
- c. Viragem à direita: 1600 veic/h/via.

Posteriormente, procedeu-se à delimitação das fases de ciclos correspondentes a cada conjunto de movimentos em cada interseção semaforizada. No quadro 4.1 é representado o ciclo para todos os nós respeitantes a este tipo de interseções. Em cada fase está referido a tempo de verde real (canto inferior esquerdo) e o tempo de inter-verde (canto inferior direito), sendo que o tempo de ciclo corresponde à soma destes dois tempos de todas as fases; no canto superior esquerdo da primeira fase indica-se o tempo de *offset*.

Quadro 4.1 – Ciclos correspondentes a todas as interseções semaforizadas

Nó	Fases [seg]			
6	<p>80 30 5</p>	<p>39 0 11 6 9</p>	<p>0</p>	<p>0</p>
7	<p>69 46 5</p>	<p>34 6 9</p>	<p>0</p>	
8	<p>53 55 5</p>	<p>25 6 9</p>	<p>0</p>	
9	<p>43 55 5</p>	<p>26 5 9</p>	<p>0</p>	
11	<p>30 23 5</p>	<p>35 5 19 5 8</p>	<p>0</p>	
17	<p>80 29 5</p>	<p>40 0 11 6 9</p>	<p>0</p>	<p>0</p>
18	<p>91 38 5</p>	<p>42 6 9</p>	<p>0</p>	



Assim, com toda a rede modelada e a partir da estimação das matrizes Origem-Destino com base nas contagens das diferentes secções de contagem, foi possível realizar-se a afetação/simulação e, assim, obter-se uma “imagem” das condições de circulação da rede e consequente previsão das variáveis de tráfego.

Para uma análise representativa desta rede, decidiu-se estudar apenas um dia da semana, mais precisamente duas horas simbólicas desse dia, ou seja, dois intervalos de tempo que representem procura (débitos) o mais distintos possíveis, de forma a poder-se estudar e comparar o desempenho do arco ao nível de fluidez em alturas do dia com características completamente diferentes. Desta forma, optou-se por analisar o dia útil 18 (correspondente a uma segunda-feira), sendo que os períodos de tempo escolhidos foram os intervalos de tempo das 8h às 9h e das 12h às 13h; a escolha destes intervalos foi tomada tendo como apoio a figura 4.6.

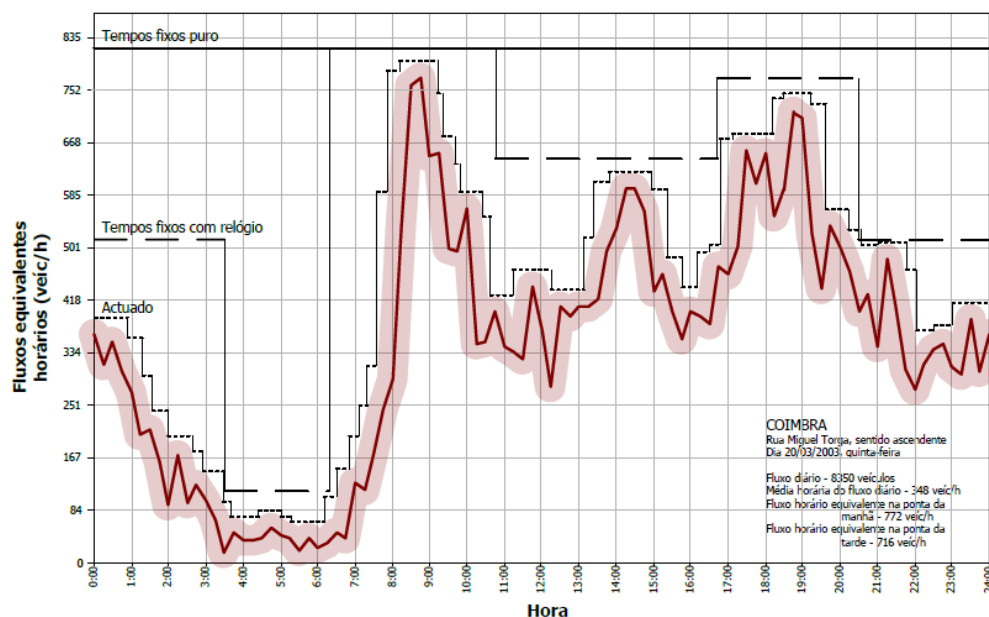


Figura 4.6 – Perfil temporal Capacidade/Procura vs. Tipo de regulação (SVC 2014)

Desta forma, com os dois intervalos de tempo definidos e os respetivos débitos calculados, e tendo por base os dados já tratados/corrigidos, recolheu-se do modelo SATURN as variáveis adicionais que achou-se serem pertinentes para a determinação dos indicadores referidos no capítulo 3 desta dissertação.

Quadro 4.2 – Descrição dos dados de interesse retirados do modelo SATURN

Dados	Descrição
<i>Counts</i>	Débitos [veic/h]
<i>Capacity</i>	Capacidade [veic/h]
<i>V/C ratio</i>	Rácio Débito/Capacidade (em vez de Volume/Capacidade)
<i>Free flow time</i>	Tempo de percurso do arco em regime livre [seg]
<i>Cruise time</i>	Tempo de percurso do arco em regime de congestionamento [seg]
<i>Free flow speed</i>	Velocidade em regime livre [km/h]
<i>Cruise speed</i>	Velocidade em regime de congestionamento [km/h]
<i>Delay</i>	Atraso médio por veículo na interseção [seg]

4.2.3. SELEÇÃO E PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO A UTILIZAR

Tendo em vista a comparação de indicadores de desempenho para hierarquização dos diferentes arcos quanto ao seu desempenho, isto é, quantificação da qualidade de circulação, de arcos numa rede viária, e tendo em consideração os recursos limitados à disposição, foi imprescindível definir critérios para selecionar, entre os indicadores analisados e mencionados no capítulo anterior, quais os que deviam fazer parte do estudo em causa.

Os critérios de seleção definidos para apoiar na decisão de escolha dos indicadores a serem utilizados no caso em estudo são:

- a. Os indicadores devem ser individualizados por arco da rede de estudo, de forma a permitir a comparação e hierarquização ao nível do seu desempenho;
- b. Os indicadores não devem ter em consideração a influência que os arcos têm uns nos outros.

Desta forma, pelo primeiro critério são eliminados os indicadores de Robustez de Viagens em Rede (NTR), e de Exposição (IE); pelo segundo critério são eliminados os indicadores de Robustez da Rede (NRI), de Robustez da Rede Modificado (NRI-m), e de Importância (II).

Assim, conclui-se que os indicadores a serem determinados são os seguintes:

- a. Nível de Serviço (NS), ou seja, indicadores caracterizadores desta medida de desempenho;
- b. Volume/Capacidade (V/C);
- c. Indicador de Congestionamento (CI);
- d. Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento (ICMC).

O quadro 4.3 reproduz parte do quadro 3.4, apresentando apenas os indicadores selecionados para o estudo do caso prático.

Quadro 4.3 – Comparação entre os indicadores a utilizar na análise do caso prático e os atributos considerados
(Adaptado de Oliveira 2012)

Atributos	Indicadores de desempenho			
	NS	V/C	CI	ICMC
Congestionamento	Direto	Direto	Direto	Direto
Confiabilidade	Indireto	Indireto	Indireto	Direto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Risco	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto
Abrangência	Arco	Arco	Arco	Rede
Dificuldade	Alta	Baixa	Baixa	Baixo

Tendo em consideração que na rede viária em estudo, as interseções não semaforizadas não englobam movimentos não prioritários, o indicador de desempenho inerente a este tipo de situação não é analisado. Por outro lado, as interseções semaforizadas constituem praticamente a rede como um todo, pelo que o indicador de desempenho referente a este caso, ou seja, o atraso médio por veículo, é imprescindível

para a análise de fluidez da circulação viária. Este último indicador, caracterizador da medida de desempenho Nível de Serviço, trata-se de um dado recolhido diretamente do modelo SATURN.

Em relação ao indicador de desempenho Volume/Capacidade, este rácio sofreu uma adaptação, no sentido em que em vez de se utilizar o número de veículos que passam num dado contador numa dada hora, considerou-se o débito, referente aos 15 minutos mais concentrados. Salienta-se que, enquanto o débito é resultante do tratamento de dados brutos, a capacidade é retirada do modelo SATURN.

Para a determinação do Indicador de Congestionamento (CI), considerou-se a expressão 3.4, na qual é necessário saber os tempos de percurso em regime livre e em regime de congestionamento; ambos os tempos foram recolhidos através do modelo SATURN.

Por último, ao analisar-se o referido em 3.3.2.7., alusivo ao Indicador de Custo Marginal de Congestionamento (ICMC), decidiu-se que este indicador seria calculado usando duas matrizes; a primeira matriz corresponde aos débitos respeitantes aos volumes de tráfego tratados, ao passo que a segunda matriz trata-se da primeira multiplicada por um fator de 1,01, ou seja, foi criada uma matriz de débitos 1% superior à matriz original. Desta forma, é possível retirar do modelo SATURN as velocidades de percurso em regime de congestionamento para ambos os casos. Para além disso, por simplificação, considerou-se o valor médio do tempo consumido no arco como unitário; porém teve-se que recorrer a um fator de multiplicação de 100 para este indicador, de modo a trabalhar-se com um menor número de casas decimais.

Assim, é possível reproduzir a expressão já referida para o ICMC:

$$ICMC_a = \left(\frac{1}{s_{a1}} - \frac{1}{s_{a0}} \right) \times \frac{fl_{a0} + fl_{a1}}{2} \times ct_a \times \frac{1}{fl_{a1} - fl_{a0}} \quad (4.1)$$

em que,

$ICMC_a$ – Custo marginal de congestionamento por unidade de distância num arco a [€/km];

s_{a0} e s_{a1} – Velocidades, no arco a, antes e depois do aumento no produto débito*distância respetivamente [km/h];

fl_{a0} e fl_{a1} – Débito*distância inicial e final, respetivamente, no arco a [veic/h];

ct_a – Valor médio do tempo consumido no arco a [€/h]: neste caso, $ct_a = 1$ €/h.

4.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente subcapítulo tem como objetivo a obtenção de hierarquias alternativas de importância de arcos, respeitantes ao seu desempenho, tendo por base os diferentes indicadores selecionados, e aplicando-se a metodologia descrita no subcapítulo antecedente. O objetivo é verificar a aplicabilidade da metodologia e a coincidência ou não das hierarquias decorrentes da utilização dos indicadores testados.

Como já foi referido, escolheu-se os períodos horários [08:00;09:00] e [12:00;13:00] do dia 18 de Novembro de 2013 para hierarquizar os arcos da zona 9. O quadro 4.4 apresenta os volumes de veículos contados e os respetivos débitos para todos os contadores a serem considerados para a zona 9, no intervalo de tempo das 8h às 9h; o quadro 4.5 é homólogo ao quadro 4.4, sendo que representa o período horário das 12h às 13h.

Quadro 4.4 – Volume e Débito vs. Contador (8h:9h)

Contador	Arco	Volume, V [veic/15min]				Débito, q [veic/h]
		8h00:8h15	8h15:8h30	8h30:8h45	8h45:9h00	
1	22-11	153	178	156	147	712
2	9-8	384	487	512	525	2100
3	8-3	137	232	203	162	928
4	8-7	216	271	284	249	1136
5	7-6	197	214	168	163	856
6	7-18	174	209	190	165	836
10	17-18	275	346	358	290	1432
11	17-25	185	195	165	216	864
12	25-17	63	59	75	89	356
13	17-6	69	85	112	132	528
14	18-19	183	239	193	171	956
15	22-23	111	227	261	179	1044

Quadro 4.5 – Volume e Débito vs. Contador (12h:13h)

Contador	Arco	Volume, V [veic/15min]				Débito, q [veic/h]
		12h00:12h15	12h15:12h30	12h30:12h45	12h45:13h00	
1	22-11	70	68	82	76	328
2	9-8	333	284	359	366	1464
3	8-3	118	74	124	134	536
4	8-7	179	169	174	206	824
5	7-6	159	142	137	166	664
6	7-18	29	39	30	31	156
10	17-18	200	211	150	246	984
11	17-25	101	118	119	102	476
12	25-17	79	71	87	87	348
13	17-6	77	87	89	120	480
14	18-19	136	136	144	127	576
15	22-23	104	96	143	106	572

Salienta-se que, uma vez que para a modelação da rede não se teve em consideração as interseções existentes a que os arcos de “saída” da rede iriam convergir, decidiu-se não avaliar o desempenho desses mesmos arcos. Assim, os arcos 8-3, 17-25 e 22-23, cujos contadores são o 3, 11 e 15, respetivamente, não foram sujeitos a análises.

4.3.1. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO NÍVEL DE SERVIÇO

O indicador de desempenho a ser considerado para esta medida de desempenho é o atraso médio por veículo, d [seg], para as interseções semaforizadas. Como já foi referido em 4.2.3., este indicador foi retirado diretamente do modelo SATURN; por outro lado, a medida de desempenho foi atribuída tendo por base o quadro 3.3. Salienta-se que, como também já foi mencionado, neste caso em particular, o nível de serviço para o arco correspondente ao contador 14 é desprezável, uma vez que trata-se de um arco representativo de movimentos que não sofrem qualquer tipo de atraso.

Desta forma, foi possível obter o indicador de desempenho, e respetivo Nível de Serviço, dos arcos que convergem a uma interseção semaforizada, para os dois intervalos de tempo estipulados para análise; tal determinação é apresentada nos quadros 4.6 e 4.7.

Quadro 4.6 – Indicador de desempenho atraso, d , e medida de desempenho Nível de Serviço (8h:9h)

Contador	Arco	d [seg]	NS
1	22-11	24,54	C
2	9-8	11,52	B
4	8-7	7,44	A
5	7-6	335,55	F
6	7-18	26,27	C
10	17-18	20,54	C
12	25-17	22,91	C
13	17-6	66,71	E
14	18-19	0	

Quadro 4.7 – Indicador de desempenho atraso, d , e medida de desempenho Nível de Serviço (12h:13h)

Contador	Arco	d [seg]	NS
1	22-11	22,57	C
2	9-8	8,7	A
4	8-7	4,95	A
5	7-6	23,68	C
6	7-18	24,5	C
10	17-18	16,57	B
12	25-17	22,72	C
13	17-6	18,34	B
14	18-19	0	

Ao analisar ambos os quadros, constata-se que, como seria de esperar, a qualidade de fluidez de circulação encontra-se mais degradada nos chamados horários de pico, ou seja, horários com maior procura por parte dos utilizadores da rede viária, sendo que, no presente estudo, tal período encontra-se representado pelo intervalo de tempo das 8h às 9h. De facto, neste período horário, os níveis de serviço atingem o seu mínimo, sendo que, ao afastarem-se destes períodos de maior procura, vêm o seu desempenho melhorar; exemplo disso é o arco 7-6, que no período de pico encontra-se com NS F e no intervalo de tempo 12h:13h já atinge o NS C.

Os quadros 4.8 e 4.9 ilustram a hierarquização desta rede viária, ao nível do desempenho dos seus arcos constituintes, tendo por base o indicador atraso médio por veículo em interseções semaforizadas, para os dois períodos horários estudados.

Quadro 4.8 – Hierarquização dos arcos segundo Nível de Serviço (8h:9h)

Contador	Arco	Hierarquia
14	18-19	1
4	8-7	2
2	9-8	3
10	17-18	4
12	25-17	5
1	22-11	6
6	7-18	7
13	17-6	8
5	7-6	9

Quadro 4.9 – Hierarquização dos arcos segundo Nível de Serviço (12h:13h)

Contador	Arco	Hierarquia
14	18-19	1
4	8-7	2
2	9-8	3
10	17-18	4
13	17-6	5
1	22-11	6
12	25-17	7
5	7-6	8
6	7-18	9

4.3.2. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO RÁCIO DÉBITO/CAPACIDADE

A metodologia de determinação deste indicador encontra-se descrita em 4.2.3., sendo que a partir desta foi possível obter os seguintes quadros representativos do rácio Débito/Capacidade para os dois intervalos horários em análise.

Quadro 4.10 – Hierarquização dos arcos segundo q/C (8h:9h)

Contador	Arco	q/C [%]	Hierarquia
14	18-19	18	1
1	22-11	40	2
5	7-6	44	3
13	17-6	48	4
12	25-17	54	5
6	7-18	56	6
4	8-7	59	7
10	17-18	59	8
2	9-8	63	9

Quadro 4.11 – Hierarquização dos arcos segundo q/C (12h:13h)

Contador	Arco	q/C [%]	Hierarquia
6	7-18	11	1
14	18-19	11	2
1	22-11	18	3
5	7-6	33	4
13	17-6	35	5
10	17-18	40	6
4	8-7	42	7
2	9-8	44	8
12	25-17	52	9

Ao analisar os quadros anteriores, constata-se que, segundo este indicador, o desempenho dos arcos não é independente do período horário em análise; de facto, alguns arcos vêm a sua hierarquização mudar drasticamente, sendo exemplo disso o arco 7-18, que das 8h às 9h encontra-se na posição 9 e das 12h às 13h encontra-se na posição 1.

4.3.3. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO INDICADOR DE CONGESTIONAMENTO

Este indicador teve como base de determinação a metodologia já referida em 3.3.3.1. Assim, utilizando a expressão 3.4., foi possível hierarquizar-se os arcos da rede correspondentes à zona 9. Tal hierarquização apresenta-se nos seguintes quadros.

Quadro 4.12 – Hierarquização dos arcos segundo CI (8h:9h)

Contador	Arco	CI	Hierarquia
14	18-19	1,000	1
4	8-7	1,547	2
2	9-8	2,290	3
1	22-11	3,066	4
10	17-18	3,098	5
12	25-17	3,448	6
6	7-18	4,507	7
13	17-6	10,265	8
5	7-6	32,477	9

Quadro 4.13 – Hierarquização dos arcos segundo CI (12h:13h)

Contador	Arco	CI	Hierarquia
14	18-19	1,000	1
4	8-7	1,364	2
2	9-8	1,974	3
10	17-18	2,693	4
1	22-11	2,900	5
5	7-6	3,221	6
12	25-17	3,427	7
13	17-6	3,547	8
6	7-18	4,271	9

Numa primeira análise dos quadros 4.12 e 4.13, verifica-se que o arco 18-19 não apresenta, segundo este indicador, qualquer tipo de congestionamento, o que não é inteiramente verdade; o que acontece é que uma vez que o arco tem um comprimento tão pequeno e, como não encontra-se associado a atrasos por parte de outros movimentos ou interseções semaforizadas, mesmo que haja congestionamento, este não consegue ser refletido com exatidão no tempo de percurso em regime de congestionamento (t_f), daí este indicador ser unitário para arcos com estas características.

Por outro lado, em relação aos restantes arcos, pode-se afirmar que a hierarquização respeitante ao desempenho apresentada já era a esperada. De facto, mesmo com pequenas flutuações de arcos na hierarquização, consoante o período horário em análise, é expectável que este indicador seja inferior para movimentos que não se encontrem sujeitos a possíveis paragens obrigatórias por parte de semáforos, sendo que os arcos com maior CI são sempre os que convergem a interseções semaforizadas.

4.3.4. HIERARQUIZAÇÃO DOS ARCOS PELO INDICADOR DE CUSTO MARGINAL SOB CONGESTIONAMENTO

A metodologia de determinação do Indicador de Custo Marginal sob Congestionamento (ICMC) é a apresentada no subcapítulo 4.2.3. O quadro 4.14 apresenta os débitos reais e os correspondentes à sua multiplicação pelo fator 1,01, assim como as respetivas velocidades de percurso em regime de congestionamento, para os intervalos de tempo em análise; os débitos, q , encontram-se em veic/h, e as velocidades, s , em km/h.

Quadro 4.14 – Débitos e velocidades em regime de congestionamento antes (0) e depois (1) da multiplicação pelo fator 1,01

Contador	Arco	8h:9h				12h:13h			
		q_0	s_0	q_1	s_1	q_0	s_0	q_1	s_1
1	22-11	712	16,31	719	16,29	328	17,24	331	17,23
2	9-8	2100	21,83	2121	21,73	1464	25,32	1479	25,29
3	8-3	928	46,61	937	46,61	536	49,77	541	49,77
4	8-7	1136	32,33	1147	19,54	824	36,66	832	36,64
5	7-6	856	1,54	865	1,47	664	15,52	671	15,49
6	7-18	838	11,09	846	10,92	157	11,7	159	11,65
10	17-18	1432	16,14	1446	16,11	984	18,57	994	18,56
11	17-25	864	48,36	873	48,36	476	49,86	481	49,86
12	25-17	356	14,5	360	14,47	348	14,59	351	14,57
13	17-6	528	4,87	533	4,49	480	14,1	485	14,08
14	18-19	956	50	966	50	576	50	582	50
15	22-23	1044	49,83	1054	49,83	572	49,99	578	49,99

Examinando o quadro anterior, constata-se que as velocidades, apesar de baixarem com o aumento dos débitos, como seria de prever, não o fazem de forma regular e nem seguem nenhuma tendência, pelo que conclui-se que será sempre necessário recorrer-se a modelos como o SATURN para poder-se determinar as velocidades em regime de congestionamento.

Para além disso, é importante salientar o arco 18-19, que, independentemente do débito em causa, apresenta sempre uma velocidade em regime de congestionamento idêntica à do regime livre, 50 km/h. Tal acontecimento já foi justificado em 4.3.3.

Ainda verifica-se que os arcos 8-3, 17-25 e 22-23 não apresentam qualquer variação na velocidade em regime de congestionamento, para além desta ser bastante próxima da velocidade em regime livre. Esta constância de valores pode ser justificada pelo facto que, como já foi mencionado, para a modelação da rede viária realizada, os movimentos associados a estes arcos não se encontram submetidos a qualquer tipo de constrangimento por parte de outros movimentos ou interseções a montante, daí a importância em não considerar-se a análise destes arcos na análise da restante rede.

De seguida, apresenta-se os quadros 4.15 e 4.16, nos quais encontram-se o indicador já calculado e a hierarquização dos arcos, pelo seu desempenho, para os dois períodos horários em análise.

Quadro 4.15 – Hierarquização dos arcos segundo ICMC (8h:9h)

Contador	Arco	ICMC	Hierarquia
14	18-19	0	1
1	22-11	0,757	2
10	17-18	1,160	3
12	25-17	1,437	4
2	9-8	2,119	5
6	7-18	14,108	6
13	17-6	174,652	7
4	8-7	203,473	8
5	7-6	310,761	9

Quadro 4.16 – Hierarquização dos arcos segundo ICMC (12h:13h)

Contador	Arco	ICMC	Hierarquia
14	18-19	0	1
4	8-7	0,150	2
10	17-18	0,292	3
1	22-11	0,338	4
2	9-8	0,471	5
12	25-17	0,946	6
13	17-6	1,012	7
5	7-6	1,254	8
6	7-18	3,687	9

Considerando o que já foi dito neste subcapítulo, era previsível que o indicador ICMC fosse nulo para o arco 18-19, assim, como já era presumível que o valor deste indicador baixasse consoante a análise afastasse-se dos períodos de maior fluidez de tráfego.

No entanto, é de salientar a discrepância de hierarquias que o arco 8-7 apresenta para as duas situações; tal acontece pois no período de análise das 8h às 9h, a diferença de velocidades em regime de congestionamento é muito superior à diferença para o período horário das 12h às 13h, em proporção às restantes diferenças homólogas determinadas.

4.4. CONCLUSÕES DO CASO PRÁTICO

Os objetivos principais do Caso Prático foram alcançados, visto ter-se verificado ser possível a determinação de indicadores selecionados, utilizando os recursos disponíveis. Foi possível ainda a comparação dos resultados obtidos, para os arcos em análise.

Ainda observou-se, de forma preliminar, que as diferenças entre as hierarquias apresentadas pelos diferentes indicadores sugerem uma correlação com os aspetos focados pelas diferentes metodologias, aspetos esses já retratados em 3.4.

De facto, os atributos analisados no capítulo anterior podem servir de base para uma hierarquização ao nível do desempenho dos arcos global, ou seja, uma hierarquização resultante das hierarquizações de todos os indicadores determinados.

Para tal ser possível, é fundamental que a cada indicador esteja associada uma pontuação, reflexo dos atributos estudados: congestionamento, confiabilidade, vulnerabilidade, risco, flexibilidade, abrangência e dificuldade de determinação.

Assim, atribui-se as seguintes pontuações aos primeiros cinco parâmetros referidos:

- a. Indiferente – 2 pontos;
- b. Indireto – 1 ponto;
- c. Direto – 0 pontos.

Salienta-se que, ao contrário do que seria expectável, a atribuição de pontuação foi a dada (a melhor pontuação corresponde ao pior caso), pois na hierarquização dos arcos, foram-lhes atribuídos valores que vão aumentando com a degradação do desempenho do arco, ou seja, o arco com melhor desempenho fica com o valor 1 (referente ao melhor lugar na hierarquia) enquanto o arco com pior desempenho fica com o valor 9, valor respeitante à pior posição da hierarquia. Só desta forma, é possível uma posterior correlação direta dos atributos aos arcos hierarquizados.

Por outro lado, os parâmetros abrangência e dificuldade de determinação apresentam a mesma relevância, daí não servirem para uma comparação quantitativa entre os diferentes indicadores de desempenho.

O quadro seguinte apresenta os indicadores determinados conforme os seus atributos, e consequente pontuação.

Quadro 4.17 – Classificação dos indicadores de desempenho quanto aos seus atributos

Atributos	Indicadores de desempenho			
	NS	V/C, q/C	CI	ICMC
Congestionamento	Direto	Direto	Direto	Direto
Confiabilidade	Indireto	Indireto	Indireto	Direto
Vulnerabilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Risco	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Indiferente
Flexibilidade	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Direto
Pontuação	7	7	7	4

Note-se que tendo em consideração o que foi dito, é sempre preferível o indicador de desempenho com a pior a pontuação possível.

Assim, pelos critérios de pontuação, destaca-se com 4 pontos o ICMC, pois apresenta a vantagem de ter em consideração a facilidade que a rede tem em adaptar-se a possíveis mudanças, quer na procura, quer na própria infraestrutura; para além disso, ainda tem em consideração, de forma direta, a confiança que os utilizadores têm quanto ao desempenho satisfatório da rede viária.

Os quadros 4.18 e 4.19 apresentam a hierarquização dos arcos segundo os diferentes indicadores determinados, tanto para intervalo horário das 8h às 9h, como para o das 12h às 13h.

Quadro 4.18 – Hierarquização dos arcos (8h:9h)

Cont.	Arco	NS(d)	q/C	CI	ICMC
1	22-11	6	2	4	2
2	9-8	3	9	3	5
4	8-7	2	7	2	8
5	7-6	9	3	9	9
6	7-18	7	6	7	6
10	17-18	4	8	5	3
12	25-17	5	5	6	4
13	17-6	8	4	8	7
14	18-19	1	1	1	1

Quadro 4.19 – Hierarquização dos arcos (12h:13h)

Cont.	Arco	NS(d)	q/C	CI	ICMC
1	22-11	6	3	5	4
2	9-8	3	8	3	5
4	8-7	2	7	2	2
5	7-6	8	4	6	8
6	7-18	9	1	9	9
10	17-18	4	6	4	3
12	25-17	7	9	7	6
13	17-6	5	5	8	7
14	18-19	1	2	1	1

A esta hierarquização ainda pode ser aplicado uma matriz de multiplicação respeitante à pontuação correspondente a cada indicador de desempenho, já referida e determinada neste subcapítulo.

Assim, cada arco vê o seu valor hierárquico (1 a 9), de cada indicador, ser multiplicado pela respetiva pontuação dada a cada indicador de desempenho. Desta forma, crê-se ser possível uma hierarquização global mais correta, uma vez que tem em consideração as qualidades e defeitos de cada indicador.

O quadro 4.20 apresenta o resultado da multiplicação do valor hierárquico de cada arco pela pontuação de cada indicador, assim como a sua posição hierárquica, agora geral, para os dois intervalos horários estudados.

Quadro 4.20 – Hierarquização dos arcos tendo em consideração os indicadores de desempenho ponderados pelos seus atributos

Contador	Arco	8h:9h		12h:13h	
		Valor	Hierarquia	Valor	Hierarquia
1	22-11	48	2	66	4
2	9-8	75	5	72	5
4	8-7	81	6	45	2
5	7-6	117	9	102	7
6	7-18	96	7	111	9
10	17-18	69	3	60	3
12	25-17	72	4	105	8
13	17-6	102	8	105	6
14	18-19	15	1	18	1

Ao analisar o quadro 4.20, verifica-se que, tendo por base todos os indicadores de desempenho e os seus parâmetros de caracterização, a hierarquização dos arcos, ao nível do seu desempenho, é aproximadamente constante nos dois períodos temporais estudados, sendo que apenas os arcos 8-7 e 25-17 representam a exceção.

Em suma, é possível afirmar que este tipo de análise de arcos, considerando, não só os indicadores de desempenho utilizados, mas também os atributos mais positivos ou negativos que uns têm em relação aos outros, permite obter uma hierarquização ao nível do desempenho de uma dada rede viária de forma mais correta.

Para além disso, ao recorrer-se a uma matriz de pontuações, como no presente estudo, o trabalho e dificuldade acrescidos ao processo de hierarquização de uma dada rede viária pode ser considerado desprezável, tendo em conta as vantagens que este processo acarreta.

5

Conclusões e Perspetivas Futuras

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A gestão do tráfego em meio urbano requer, predominantemente, um conhecimento contínuo e metódico do comportamento das viagens realizadas na infraestrutura viária, sendo, portanto, necessário um esforço considerável no levantamento, tratamento e análise de dados de tráfego, obtidos em campo. Entre as alternativas disponíveis para a recolha e processamento deste tipo de dados, é possível destacar a tecnologia referente ao controlo centralizado de tráfego urbano (UTC), que compõe uma das aplicações dos Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS).

Para realizar-se o controlo do tráfego urbano, os sistemas UTC recolhem e processam um grande volume de dados em tempo real; por sua vez, o armazenamento dos dados obtidos é, em alguns sistemas, efetuado numa base de dados específica (ex: *software* ASTRID).

Porém, em muitos casos, os sistemas UTC que detêm este tipo de base de dados não dispõem de mecanismos para a sua partilha com outros órgãos gestores. Além disso, os técnicos enfrentam graves desafios em aceder e tratar uma vasta quantidade de dados de forma a transformá-la, de modo eficaz, em informações úteis e credíveis, para posterior apoio na gestão do tráfego urbano.

Neste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm mostrado ser uma ferramenta importante no acesso alternativo e eficiente, modelação flexível e atribuição de carácter espacial aos dados de tráfego recolhidos previamente por sistemas UTC, viabilizando múltiplas aplicações relativas à gestão do tráfego.

Todavia, a obtenção dos dados por si só não serve de nenhum uso para a gestão de uma rede viária. Nesse sentido, surge a necessidade da construção de indicadores e medidas de desempenho que contribuam para a otimização dos investimentos no setor de transportes.

De facto, indicadores concisos e objetivos facilitam o diagnóstico dos problemas de uma dada malha viária, e permitem a hierarquização dos seus ramos ou regiões críticas, através da análise do seu desempenho, propondo uma priorização na resolução dos problemas identificados.

A presente dissertação teve como destaque a análise de indicadores de desempenho relacionados com a fluidez do tráfego urbano. Para tal, foram levantados os principais indicadores encontrados na literatura, analisadas as suas funções e verificada a sua aplicabilidade a uma situação real, apresentada no quarto capítulo.

A análise dos indicadores de desempenho incentivou a identificação de atributos que serviram como base para a comparação dos diferentes indicadores.

O aspecto Congestionamento refere-se à forma como o congestionamento é abordado por cada indicador, sendo este o indício mais notório do mau desempenho de uma rede viária. O atributo Confiabilidade diz respeito à confiança que se pode ter no desempenho satisfatório de uma rede, principalmente quando o assunto em causa é o tempo de viagem previsto. A Vulnerabilidade de uma rede relaciona o grau de desempenho que essa rede tem em função de um arco específico. Semelhante à Vulnerabilidade, surge a propriedade Risco, sendo que esta última difere da primeira no sentido em que tem em consideração a probabilidade de ocorrência de acontecimentos que quebrem a fluidez de circulação. Por sua vez, o atributo Flexibilidade encontra-se associado à facilidade de adaptação da procura em pares origem-destino alternativos de modo a conseguir-se manter o desempenho da rede. Em relação à Abrangência, este aspeto refere-se à dimensão espacial considerada pelo indicador (arco, região e/ou rede). Por último, existe o parâmetro Dificuldade de Determinação associado, como próprio nome indicia, ao custo da determinação de um dado indicador, sendo que esse custo inclui não só o investimento financeiro associado à determinação do indicador de desempenho, mas também os recursos humanos e o tempo despendido no seu cálculo.

Para confirmar a aplicabilidade dos indicadores de desempenho à realidade local, foi realizada uma aplicação prática. De todos os indicadores analisados, foram selecionados os que respeitavam os critérios previamente estabelecidos, tais como os recursos disponíveis para a sua determinação. O caso prático confirmou a importância dos aspetos tratados por cada indicador e a sua influência direta na hierarquia apresentada resultante da análise do desempenho dos arcos.

Os resultados obtidos no capítulo anterior permitem concluir que diferentes indicadores podem ser utilizados de acordo com o objetivo do diagnóstico a ser realizado.

Assim, indicadores como o rácio Volume/Congestionamento (V/C) e o Indicador de Congestionamento (CI), que analisam individualmente um arco tendo em consideração apenas os aspetos Congestionamento e Confiabilidade, permitem somente identificar problemas localizados, relacionados com a fluidez do tráfego. Como não analisam a sua relação com a restante rede viária, podem inadvertidamente levar a investimentos relacionados com o incremento da capacidade viária que venham a revelar-se desnecessários; a medida de desempenho Nível de Serviço (NS), e, conseqüentemente, os indicadores de desempenho que a sustentam, é usualmente determinada em estudos de tráfego e envolve os mesmos aspetos tratados pelos indicadores V/C e CI.

Para além destes indicadores, é possível encontrar outros que contextualizam os arcos na rede viária que os contêm, tendo, portanto, em consideração o aspeto Abrangência. Nestes casos, tende-se a produzir hierarquias mais confiáveis para a priorização de investimentos em infraestruturas, uma vez que estes indicadores consideram a existência, ou não, de caminhos alternativos e o impacto no desempenho da rede associado à interrupção, total ou parcial, de um arco, sendo que, desta forma, têm em atenção os atributos Flexibilidade, Confiabilidade e Vulnerabilidade. Naturalmente, um indicador que combine vários aspetos permite uma análise e conseqüente hierarquia mais generalizada e correta. Este é o caso do Indicador de Robustez da Rede (NRI), do Indicador de Robustez da Rede-modificado (NRI-m), do Indicador de Robustez de Viagem em Rede (NTR), do Indicador de Importância (II), e do Indicador de Exposição (IE), que tratam, direta ou indiretamente, todos os atributos de desempenho da rede viária identificados.

O indicador ICMC, baseado no método de determinação de custos marginais de congestionamento, não se apresenta como um indicador tão apelativo como os últimos cinco, uma vez que não considera os atributos Vulnerabilidade e Risco. Entretanto, é um indicador mais completo que os indicadores NS, V/C e CI, visto ter em atenção, de forma direta, os aspetos Confiabilidade e Flexibilidade.

Os resultados obtidos no Caso Prático mostram que a utilização de diferentes indicadores leva a diferentes hierarquias de importância de ligações. Além disso, apesar da sua constatação não ter sido evidente devido à reduzida quantidade de arcos que puderam ser analisados na rede viária em estudo, a análise criteriosa dos indicadores de desempenho levantados leva a crer que existe uma coerência entre as hierarquias decorrentes da aplicação de indicadores de desempenho que possuam atributos em comum.

Desta forma, a escolha do indicador de desempenho a adotar num dado projeto específico deverá ser precedida por uma análise do problema que se deseja contrariar, definindo, conseqüentemente, quais os parâmetros de desempenho de rede mais relevantes. Por razões óbvias, também deve-se ter em atenção os recursos disponíveis para o projeto (financeiros, de tempo, e de recursos humanos).

Porém, mesmo havendo limitações associadas, se estas permitirem a determinação de inúmeros indicadores de desempenho, tal deve ser encorajado, de forma a construir-se uma base de dados que permita não só a produção de hierarquias correspondentes a cada indicador, mas também produzir uma hierarquia generalizada, representativa do desempenho de todos os arcos constituintes da rede, que tenha em consideração todos os indicadores calculados e todos os parâmetros de avaliação dos mesmos; desta forma, consegue-se uma análise do desempenho da malha viária simplificada e rigorosa.

5.2. TRABALHOS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

Com base no trabalho apresentado na presente dissertação, enumeram-se sugestões para trabalhos futuros que poderão dar continuidade à investigação elaborada neste trabalho. Assim sendo, os estudos sugeridos são:

- a. Desenvolver um modelo (*software*) de aferição da qualidade de dados recolhidos pelos sistemas UTC, sendo que este modelo deve ser capaz de definir parâmetros que identifiquem possíveis dados brutos que estejam incorretos, assim como a periodicidade com que estes ocorrem;
- b. O modelo a ser desenvolvido para aferir a qualidade dos dados brutos também deve conseguir avaliar a consistência das variáveis tratadas que compõem a base de dados, de forma a informar o utilizador deste modelo sobre o grau de representatividade dos dados tratados em relação às reais condições do tráfego urbano;
- c. Desenvolver um modelo de análise de dados de tráfego, capaz de identificar padrões ou tendências relativas às condições do tráfego, tendo por base os dados do tráfego recolhidos e tratados *a priori*;
- d. Através de um caso prático, fazer uma análise comparativa que inclua os indicadores de desempenho ligados à fluidez de tráfego que não foram utilizados no caso prático da presente dissertação;
- e. Também através de um caso prático, estudar uma rede viária que inclua um número mais significativo de arcos, de forma a poder-se fazer uma análise estatística tentando procurar uma correlação entre os diversos indicadores de desempenho e o desempenho dos seus arcos constituintes;
- f. Desenvolver indicadores de desempenho ou adaptar os já existentes aos principais problemas encontrados na malha viária urbana portuguesa, com o intuito de obter-se uma avaliação mais pormenorizada e, portanto, um planeamento mais eficaz e objetivo;
- g. Com o apoio de uma análise criteriosa em indicadores de desempenho objetivos, recomendar critérios para priorização de investimentos para os principais problemas encontrados na gestão dinâmica de tráfego;

- h. Verificar a veracidade e utilidade de uma hierarquização geral, ao nível do desempenho, correspondente a uma base de dados na qual inclui-se todos os indicadores de desempenho à disposição, relacionados com a fluidez do tráfego, assim como parâmetros de avaliação desses mesmos indicadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAS. (1996). *Modelling of urban transport*. APAS Urban 2 Modelling Project, The Transport Directorate (DGVII) of the European Commission.
- Bates, John, John Polak, Peter Jones e Andrew Cook. (2001). *The valuation of reliability for personal travel*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 37 (2-3): 191-229, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.1016/S1366-5545(00)00011-9.
- Bell, Michael (2000). *A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks*. Transportation Research Part B: Methodological, 34(6), Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.1016/S0191-2615(99)00042-9.
- Berdica, Katja. (2002). *An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*. Transport Policy, 9(2): 117-127, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.1016/S0967-070X(02)00011-2.
- Bethel, J. e Jolyon D. Thurgood. (2003). *Geographic Information Systems*. In *The Civil Engineering Handbook*, Second Edition, capítulo 57, CRC Press LLC. Acedido a 19 de Março de 2015. <http://freeit.free.fr/The%20Civil%20Engineering%20Handbook,2003/0958%20ch57.pdf>.
- Bretherton, David, Keith Wood e Neil Raha. (1998). *Traffic Monitoring and Congestion Management in the SCOOT Urban Traffic Control System*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1634: 118-122. Acedido a 4 de Março de 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/1634-15>.
- Brydia, Robert, S. Turner, W. Eisele e J. Liu. (1998). *Development of intelligent transportation system data management*. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, 1625 (1): 124-130. Acedido a 31 de Março de 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/1625-16>.
- Chen, Anthony, Hai Yang, Hong Lo e Wilson Tang. (2002). *Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results*. Transportation Research Part B: Methodological, 36(3): 225-252, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.1016/S0191-2615(00)00048-5.
- Coifman, Benjamin e Yongliang Yang. (2004). *Estimating Spatial Measures of Roadway Network Usage from Remotely Sensed Data*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1554 (1): 142-152. Acedido a 30 de Março de 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/1870-17>.
- Dahlgren, Joy, Shawn Turner e Reinaldo Garcia. (2002). *Collecting, processing, archiving and disseminating traffic data to measure and improve traffic performance*. Transportation Research Board 81st Annual Meeting, 13 de Janeiro. Acedido a 27 de Março de 2015. http://www.researchgate.net/profile/Shawn_Turner/publication/228923636_Collecting_Processing_Archiving_and_Disseminating_Traffic_Data_to_Measure_and_Improve_Traffic_Performance/links/0912f50f95e1c1f696000000.pdf.
- Dantas, A, P. Taco e Y. Yamashita. (1996). *Sistemas de Informação Geograficas em Transportes: O Estudo do Estado da Arte*. X Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Brasília, Brasil, 211-222. Acedido a 19 de Março de 2015. <http://www.oocities.org/br/asdjpbpr/artigos/resumoanpet1996.pdf>.
- Dantas, A., P. Taco, Y. Yamashita e S. Bartoli. (1997). *Aplicações dos SIG em Transporte Sob o Enfoque da Análise Espacial*. IV Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, Brasil, 469-477. Acedido a 19 de Março de 2015. <http://hdl.handle.net/10092/296>.

- Diógenes, M. (2004). *Indicadores de desempenho no gerenciamento da segurança viária*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Acedido a 13 de Abril de 2015. <http://hdl.handle.net/10183/6406>.
- Erath, Alex, James Birdsall, Kay Axhausen e Rade Hajdin. (2009). *Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network*. 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington DC, USA. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.3141/2137-13.
- Feitelson, Eran e Ilan Salomon. (2000). *The implications of differential network flexibility for spatial structures*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 34 (6): 459-479, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: 10.1016/S0965-8564(99)00028-2.
- Figueiredo, Lino. (2005). *Sistemas Inteligentes de Transporte*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- Filho, Jugurta e Cirano Iochpe. (1996). *Introdução a Sistemas de Informação Geográficas com Ênfase em Banco de Dados*. XV JAI – Jornada de Atualização em Informática, 4 a 9 de Agosto, Recife, Brasil. Acedido a 19 de Março de 2015. <http://www.dpi.ufv.br/~jugurta/papers/sig-bd-jai.pdf>.
- Frihida, A., D. Marceau e M. Thériault. (2004). Extracting and visualizing space-time paths: an integration of GIS and KDD in transport demand modeling. Cartography and Geographic Information Science, 31(1): 19-28. Acedido a 24 de Março de 2015. doi: 10.1559/152304004773112749.
- Goodchild, Michael. (2000). *GIS and transportation: status and challenges*. GeoInformatica, 4 (2): 127-139, Springer. Acedido a 24 de Março de 2015. doi: 10.1023/A:1009867905167.
- Hamilton, A., B. Waterson, T. Cherrett, A. Robinson e I. Snell. (2012). *The evolution of urban traffic control: changing policy and technology*. Transportation Planning and Technology, 36 (1): 24-43. Acedido a 25 de Fevereiro de 2015. doi: 10.1080/03081060.2012.745318.
- Hounsell, N. e M. McDonald. (2001). *Urban Network Traffic Control*. Journal of Systems and Control Engineering, 215(4), 01/06/2001: 325-334. Acedido a 25 de Fevereiro de 2015. doi: 10.1177/095965180121500405.
- Jenelius, Erik e Lars-Goran Mattsson. (2012). *Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46 (5): 746-760, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi:10.1016/j.tra.2012.02.003.
- Jenelius, Erik, Tom Petersen e Lars-Goran Mattsson. (2006). *Importance and exposure in road network vulnerability analysis*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 40 (7): 537-560, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi:10.1016/j.tra.2005.11.003.
- Kaparias, I., M. Bell e M. Tomassini. (2011). *Key performance indicators for traffic management and Intelligent Transport Systems*. ISIS, 14 de Junho de 2011. Acedido a 13 de Abril de 2015. http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201204/20120402_174223_62254_D%203.5%20-%20Key%20Performance%20Indicators%20for%20traffic%20management%20and%20ITS.pdf.
- Kikuchi, Shinya, Dragana Miljkovic e Henk Zuylen. (2000). *Examination of Methods That Adjust Observed Traffic Volumes on a Network*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1717 (1): 109-119, Transport Research Board. Acedido a 30 de Março de 2015. doi: 10.3141/1717-14.

- Litman, T. (2007). *Developing Indicators For Comprehensive And Sustainable Transport Planning*. Transportation Research Record 2017: 10-15, Transport Research Board. Acedido a 13 de Abril de 2015. http://www.vtpi.org/sus_tran_ind.pdf.
- Lopes, Jorge. (2011). *Traffic prediction for unplanned events on highways*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Loureiro, C., M. Gomes e C. Leandro. (2002). *Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real*. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Natal, Brasil, 365-376, ANPET.
- Martens, M. (2013). Behavioural Adaptation to Roadway Intelligent Transport Systems. In *Behavioural Adaptation and Road Safety*, 135-160, CRC Press. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. doi: 10.1201/b14931-12.
- Martin, William e Nancy McGuckin. (1998). *Travel Estimation Techniques for Urban Planning*. National Academy Press, Washington, D.C..
- Meneses, Hamifrancny, Luís Carvalho e Carlos Loureiro. (2003). Transcoot: Uma Interface Lógica para Modelar e Georreferenciar Dados Dinâmicos do Tráfego Urbano. XVII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Rio de Janeiro, Brasil.
- Meneses, Hamifrancny, Carlos Leandro e Carlos Loureiro. (2003). *Indicadores de Desempenho para Sistemas Centralizados de Controle do Tráfego Urbano em Tempo Real*. XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, ANPET.
- Miles, John e Kan Chen. (2004). *The intelligent transport systems handbook*. 2ª ed. Swanley, Kent: AIPCR.
- Miller, Harvey e Shih-Lung Shaw. (2001). *Geographic information systems for transportation: principles and applications*. Oxford University Press, Nova Iorque.
- Neto, Paulo, Manoel Neto, Edinardo Júnior e Carlos Loureiro. (2004). *Validação das Variáveis Número Médio de Paradas e Atraso Médio Veicular Simuladas pelo Software SCOOT*. XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Florianópolis, Brasil.
- Nicholson, Alan. (2003). *Transport network reliability measurement and analysis*. Transportes, 24/10/2003, 11(2): 49-62, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.4237/transportes.v11i2.148>.
- Nowacki, G. (2012). *Development and Standardization of Intelligent Transport Systems*. CRC Press. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b11347-9>.
- Oliveira, E. L. (2012). *Indicadores para hierarquização de ligações em rede viária urbana com base em desempenho*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Acedida a 15 de Abril de 2015. http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/EduardoLealDeOliveira.pdf.
- Papageorgiou, M., M. Ben-Akiva, J. Bottom, P. Bovy, S. Hoogendoorn, N. Hounsell, A. Kotsialos e M. McDonald. (2007). ITS and Traffic Management. In *Operations Research and Management Science*, 715-774. Amsterdam: Elsevier B.V. Acedido a 26 de Fevereiro de 2015. doi: 10.1016/S0927-0507(06)14011-6.
- Penning, Mike e Beverley Bell (2012). *Framework Document for the Traffic Commissioners and Department for Transport including its agencies*. Department for Transport, London, UK. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015.

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/3573/framework-document-traffic-commissioners.pdf.

Puentes, Rob. (2000). *Deep Impact: ITS, Environmental Scourge ou Savior?*. Traffic Technology International, Abril/Maio, 106-109, UK & International Press, Surrey, UK. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. http://www.ukipme.com/mag_traffic.htm.

Safirova, Elena, Kenneth Gillingham e Sébastien Houde. (2007). *Measuring marginal congestion costs of urban transportation: Do networks matter?*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 41 (8): 734-749, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi:10.1016/j.tra.2006.12.002.

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System). (2013). *SCATS The Benchmark in Urban Traffic Control*. Acedido a 26 de Fevereiro de 2015. <http://www.scats.com.au/sitemap.html>.

SCOOT (Split Cycle Time and Offset Optimization Technique). (2014). *SCOOT Imtech Traffic and Infra UK Ltd, Siemens Traffic Controls and TRL Limited*. Acedido a 26 de Fevereiro de 2015. <http://www.scoot-utc.com>.

Scott, Darren, David Novak, Lisa Aultman-Hall e Feng Guo. (2006). *Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks*. Journal of Transport Geography, 14(6): 215-227, Elsevier. Acedido a 15 de Março de 2015. doi:10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003.

Shaw, Shih-Lung. (2010). *Geographic information systems for transportation: from a static past to a dynamic future*. Annals of GIS, 16 (3): 129-140. Acedido a 24 de Março de 2015. doi: 10.1080/19475683.2010.513155.

Shaw, Shih-Lung e Hongbo Yu. (2009). *A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical–virtual space*. Journal of Transport Geography, 17(2): 141-149, Elsevier. Acedido a 24 de Março de 2015. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.11.012.

Shladover, S. (2002). *Pathfinders*. Traffic Technology International, Agosto, 53-58, Transport Research Laboratory. Acedido a 27 de Março de 2015. http://www.ukipme.com/mag_traffic.htm.

Silva, António. (1998). *Sistemas de Informações Geográficas para Planeamento de Transportes*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Acedido a 19 de Março de 2015. <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/18/tde-03022006-154920/>.

Silva, Domingos. (2006). *Sistemas de Informação Geográfica para Transportes – Uma Aplicação aos Transportes Urbanos de Guimarães*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova de Lisboa. Acedido a 24 de Março de 2015. <http://run.unl.pt/bitstream/10362/8444/1/TSIG0012.pdf>.

Sousa, K., E. Monteiro, C. Rambaiolle, E. Factori, A. Cremonese e S. Ejzenberg. (2000). *Sistema inteligente de controle de tráfego de Santo André*. Revista de Transportes Públicos, ANTP, 2º Trimestre. Acedido a 25 de Fevereiro de 2015. http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/5D522E2F-8BD3-47B4-91CE-203C195AA0D5.pdf.

Sullivan, J., D. Novak, L. Aultman-Hall e D. Scott. (2010). *Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(5): 323-336, Elsevier. Acedido a 15 de Abril de 2015. doi:10.1016/j.tra.2010.02.003.

- SVC (Secção de Vias de Comunicação). (2014). *Apontamentos didáticos da Unidade Curricular de Circulação e Transportes 1*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taniguchi, E., Russell G. Thompson, T. Yamada e R. Van Duin. (2001). *City Logistics. Network Modelling and Intelligent Transport Systems*, Emerald, Inc.. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCLNMITS4/city-logistics-network/city-logistics-network>.
- Taniguchi, E e Russell Thompson (2014). Intelligent Transport Systems in City Logistics. In *City Logistics: Mapping the Future*, 135-173, CRC Press. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b17715-10>.
- Tavares, José. (2003). *Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afecção de Tráfego em Redes Urbanas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Tavares, José. (2014). *Apontamentos teóricos da disciplina de Circulação e Transportes 2*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Thill, Jean-Claude. (2000). *Geographic information systems for transportation in perspective*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 8 (1): 3-12, Elsevier. Acedido a 24 de Março de 2015. doi: 10.1016/S0968-090X(00)00029-2.
- TRB. (2002). *Incorporating ITS Into the Transportation Planning Process: An Integrated Planning Framework (ITS, M&O, Infrastructure) Practitioner's Guidebook*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. Washington, DC. Acedido a 23 de Fevereiro de 2015. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w118part2.pdf.
- TRB. (2010). *HCM 2010 Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- Wong, S., W. Wong, C. Leung e C. Tong. (2002). *Group-based optimization of a time-dependent TRANSYT traffic model for area traffic control*. Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier. Acedido a 25 de Fevereiro de 2015. doi:10.1016/S0191-2615(01)00004-2.
- Zang, Ming e T. Lomax. (2007). *Estimating Congestion Index at the Link Level with TransCAD GIS*. In Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China, 7-17, ASCE.

ANEXOS

Os anexos referentes ao tratamento dos dados disponibilizados pela Câmara Municipal do Porto encontram-se em formato digital.