



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estimação de emissões de tráfego através de micro simulação e sua comparação com os resultados obtidos pela macro simulação

Dissertação a apresentar para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Ana Patrícia Ramos Sampaio

Orientador

Gonçalo Homem de Almeida Rodriguez Correia (DEC-FCTUC)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação representa o culminar de uma etapa importante na minha vida académica. Agradecer é um gesto de reconhecimento e retribuição a todas as pessoas e entidades que de alguma forma colaboraram e deram apoio durante este processo.

Ao meu orientador Professor Gonçalo Correia um agradecimento especial pela atenção dada e orientação desta dissertação e pela competência científica e profissional transmitida, por toda a disponibilidade demonstrada, o apoio e paciência durante todo este processo e principalmente pela dedicação e interesse na realização desta dissertação.

Gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências por todo o apoio institucional e conhecimentos que me foram transmitidos por todos os professores.

À empresa PTV AG pela cedência da licença do *software* VISSIM, à empresa TNO pela cedência do módulo EnViVer e em especial ao Dr. Arjan Eijk da mesma empresa pelo apoio prestado na última etapa de desenvolvimento da tese.

Ao meu irmão Edgar, uma das pessoas mais importantes da minha vida, devo a minha maior gratidão por todos estes anos de amizade, companheirismo, sorrisos partilhados e por estar sempre presente. Aos meus pais estou sinceramente grata por todo o apoio, pelo esforço para que fosse possível tirar um curso académico. Agradeço também aos meus familiares por todo o carinho.

Gostaria de agradecer a um grupo de amigos, os “Primos” e a todos os meus amigos que sempre estiveram presentes. Também gostaria de agradecer a um grupo especial, As FANS, que me receberam de braços abertos e que rapidamente se tornaram companheiras. Obrigado por todo o carinho, pelos momentos de distração, diversão que sempre me proporcionaram.

Para finalizar um sincero obrigado ao Hugo. Obrigado por toda a paciência, compreensão, carinho e amizade. Obrigado por todos os conhecimentos científicos e conselhos que me transmitiste, que sem dúvida foram uma mais-valia. Obrigado por acreditares em mim e nunca me deixares baixar os braços.

RESUMO

Nas últimas décadas a poluição atmosférica evidenciou-se como um flagelo das sociedades modernas, principalmente em meio urbano onde o tráfego automóvel tem vindo a aumentar de forma substancial. Atualmente, as emissões provenientes dos transportes rodoviários representam uma das principais fontes emissoras de poluentes para atmosfera, acarretando consequências graves ao nível da degradação da qualidade do ar e da saúde pública.

A tomada de decisões estratégicas com vista à redução dos impactes das emissões baseia-se na caracterização do estado atual da rede. Os modelos de estimação de emissões rodoviárias desempenham assim um papel fundamental para que, a partir delas, sejam construídos mapas georreferenciados para caracterizar a rede e identificar pontos ou segmentos críticos em termos de emissão. Para tal recorre-se, normalmente, a Sistemas de Informação Geográfica com capacidade de roteamento baseada na representação topológica da rede rodoviária e modelação dos fluxos de tráfego.

Esta dissertação foca o problema de estimação de emissões em meio urbano, utilizando um modelo de micro simulação por comparação com um modelo de macro simulação. A comparação é feita utilizando como caso de estudo a Avenida Dom Afonso Henriques (Coimbra). Para essa avenida, calcularam-se as emissões de CO₂, NO_x e PM₁₀ utilizando o modelo de cálculo de emissões, EnViVer, incluído no *software* de micro simulação VISSIM. Os resultados foram compilados em mapas de emissões.

Os resultados obtidos no estudo mostram a influência que determinados elementos ou características da rede de transportes têm no nível de emissões, bem como as vantagens da micro simulação. Conclui-se que as emissões são fortemente dependentes da inclinação da via, das mudanças de velocidade em zonas de velocidade reduzida e dos cruzamentos. A comparação dos resultados da micro e macro simulação revelou discrepâncias significativas para todos os poluentes mas mais para o poluente PM₁₀, evidenciando os benefícios da utilização da micro simulação.

ABSTRACT

In the last few decades, air pollution has confirmed to be a noxious legacy of modern societies, especially in urban areas where road traffic is increasing exponentially. In fact, road transportation is one of the main pollution sources with regard to air pollution, with severe consequences to air quality and public health.

Planning for a sustainable future implies taking important decisions in order to reduce air pollution impact. These decisions are taken based on the characterization of the existing transportation networks and future predictions. In this sense, estimation models for road transportation emissions play a major role in order to obtain geocoded emission maps, where one can easily identify critical points and segments. These maps are produced using geographic information systems (GIS) capable of defining routes based on a topological road network representation as well as modeling traffic flows.

This dissertation focuses on the estimation of road network emissions and uses a micro simulation model by comparison to traditional macro simulation methods. The models are applied to Avenida Dom Afonso Henriques, located in Coimbra, Portugal. For this case study, we calculate the emissions of three main pollutants, CO₂, NO_x and PM₁₀ using the EnViVer estimation model included in the micro simulation software VISSIM. The emissions results are then mapped and compared with the ones obtained from the macro simulation (using the software VISUM).

The results obtained show that the level of the emissions depends on the existence of certain transportation elements and characteristics such as route slopes, speed changes in reduced speed zones and intersections where drivers have to wait for their turn to change direction. Additionally, the comparison between micro and macro simulation results revealed significant differences with regard to PM₁₀ air pollutant elements. This fact evinces that micro simulation methods may provide further and more detailed information than traditional macro simulation methods.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
ABREVIATURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos e Motivação	2
1.2 Estrutura da dissertação	3
2. ENQUADRAMENTO E RELEVÂNCIA DAS EMISSÕES AUTOMÓVEIS.....	4
3. ENQUADRAMENTO DOS MODELOS PARA ESTIMAR AS EMISSÕES AUTOMÓVEIS.....	8
3.1 Macro Simulação	8
3.1.1 <i>Software</i> VISUM PTV	10
3.2 Micro Simulação.....	10
3.2.1 <i>Software</i> VISSIM PTV.....	10
3.2.1.1 Modelos de Simulação de Tráfego	10
3.2.1.2 Abordagem de “Wiedemann”	13
3.3 Modelos de Estimação de emissões automóveis	14
3.3.1 Modelos para macro Simulação	14
3.3.1.1 HBEFA	14
3.3.1.2 COPERT	17
3.3.2 Modelos para Micro Simulação.....	19
3.3.2.1 EnViVer / VERSIT +.....	19
4. METODOLOGIA.....	23

4.1 Estudo de caso	23
4.2 Contagens	23
4.3 Utilização do <i>Software</i> VISSIM PTV	24
4.3.1 Parâmetros para a simulação	24
4.3.1.1 Funções de aceleração e desaceleração	24
4.3.1.2 Distribuição.....	25
4.3.1.3 Tipo de veículo, Classe e Categoria	26
4.3.1.4 Comportamento de condução	26
4.3.2 Modelação da rede de tráfego VISSIM PTV	31
4.3.2.1 Codificação da rede	31
4.3.2.2 Tráfego Automóvel.....	34
4.3.2.3 Intersecções não sinalizadas	37
4.4 Utilização do módulo EnViVer	41
4.5 Cálculo de emissões no modelo macro - HBEFA	43
5. RESULTADOS	45
5.1 <i>Software</i> VISSIM	45
5.2 Módulo EnViVer	47
5.3 Módulo HBEFA	58
5.4 Módulo EnViVer VS Módulo HBEFA	59
6. CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Emissão de GEE (sem LULUCF) por sector de emissão, entre 1990 e 2010. (Fonte: INE, I.P., 2012)	5
Figura 2.2 - Emissões de GEE (sem LULUCF) por sector de emissão, em 2010. (Fonte: INE, I.P., 2012)	6
Figura 3.2 - Comunicação entre o simulador de tráfego e o gerador do estado de sinal (Fonte: VISSIM User Manual, 2012).....	11
Figura 3.3 - <i>Car following logic</i> , segundo Wiedemann (1974) (Fonte: VISSIM User Manual, 2012).....	12
Figura 3.4 – Ligação entre VISUM e HBEFA (Fonte: Ferreira, 2012)	15
Figura 4.1 – Representação dos fluxos de tráfego da rede para o PPM.	24
Figura 4.2 – Janela das características das Distribuições das Velocidades Desejadas.....	25
Tabela 4.1 – Características dos tipos de veículos, classe de veículos e categoria dos veículos.	26
Figura 4.3 – Janela das características do comportamento do <i>Car following</i>	28
Figura 4.4 – Janela das características da mudança de pista.	30
Figura 4.5 – Janela das características do comportamento lateral.....	31
Figura 4.6 – Vista aérea da Avenida Dom Afonso Henriques (linha verde) e suas ruas secundárias (linhas vermelhas) com orientação Norte-Sul.....	32
Figura 4.7 – Janela das características da composição de veículos.....	35
Figura 4.8 – Janela das características da entrada de veículos.	36
Figura 4.9 – Janela das características das decisões de roteamento.	37
Figura 4.10 – Janela das características das Regras de Prioridade.....	38
Figura 4.11 – Janela com as características das áreas de conflito.	41
Figura 4.12 – Janela com as características das atribuições da classe de veículos selecionada.	42
Figura 4.13 – Botão do cálculo das emissões do tráfego selecionado.....	43
Figura 4.14 – Frota de veículos inserida no VISUM.....	44
Figura 5.1 – Exibição da rede rodoviária (2D).....	46

Figura 5.2 – Exibição da rede rodoviária (3D).....	46
Figura 5.3 – Mapeamento da classe de veículos.	47
Figura 5.4 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente para a 1ª medição.	48
Figura 5.5 – <i>Sample count</i> por cada célula da grelha.	49
Figura 5.6 – Emissões totais de CO ₂ por célula da grelha[g].....	50
Figura 5.7 – Emissões de CO ₂ por km [g/km].....	50
Figura 5.8 – Concentração de emissões de CO ₂ [µg/m ³] da rede em geral e respectivos cruzamentos.....	51
Figura 5.9 – Emissões totais de NO _x por célula da grelha [g].....	53
Figura 5.10 – Emissões de NO _x por km [g/km].	53
Figura 5.11 – Concentração de emissões de NO _x [µg/m ³] da rede em geral e respectivos cruzamentos.....	54
Figura 5.12 – Emissões totais de PM ₁₀ por célula da grelha [g].	56
Figura 5.13 – Emissões de PM ₁₀ por km [g/km].....	56
Figura 5.14 – Concentração de emissões de PM ₁₀ [µg/m ³] da rede em geral e respectivos cruzamentos.....	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 – Média e desvio padrão dos valores das emissões acumuladas por tipo de poluente, ao fim de 10 medições.	48
Quadro 5.2 – Valores das emissões no ponto mais crítico da rede (cruzamento α).	58
Quadro 5.3 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente, através do módulo HBEFA para a hora de ponta da manhã.	59
Quadro 5.4 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente para os módulos EnViVer e HBEFA.	59

ABREVIATURAS

AEA	Agência Europeia do Ambiente
ARTEMIS	<i>Assessment and Reliability of Transport Emissions Models and Inventory Systems</i>
Cd	Cádmio
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP-18	18ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
COPERT	<i>Computer Program to calculate Emissions from Road Traffic</i>
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metânicos
Cr	Crómio
Cu	Cobre
EMEP/EEA	<i>European modeling and Evaluation Programme/ European Environment Agency</i>
FOEN	<i>Swiss Federal Office for the Environment</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HAPs	Hidrocarbonetos Aromáticos
HBEFA	<i>HandBook Emission FActor for road transport</i>
HGV	<i>Heavy Goods Vehicle</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
LGV	<i>Light Goods Vehicle</i>
LULUCF	<i>Land Use, Land-Use Change and Forestry</i>
NH ₃	Amónia
Ni	Níquel
NO	Monóxido de Azoto
NO _x	Óxidos de Azoto

NO ₂	Dióxido de Azoto
N ₂ O	Óxido Nitroso
OD	Origem Destino
Pb	Chumbo
PHEM	<i>Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model</i>
PM	Partículas em Suspensão
PPM	Período de Ponta da Manhã
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
PrT	Transporte Privado
PTV	<i>Planung Transport Verkehr</i>
TNO	The Netherlands Organisation
TU Graz	<i>Graz University of Technology</i>
Se	Selénio
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TERM	<i>Transport and Environment Reporting Mechanism</i>
Zn	Zinco

1. INTRODUÇÃO

No decorrer das últimas décadas, as preocupações ambientais, nomeadamente com a poluição atmosférica em meio urbano (local onde atinge maiores concentrações), têm sido tema de discussão constante na sociedade civil. Estamos a atingir patamares inimagináveis no que diz respeito aos níveis de poluição e degradação ambiental. A poluição atmosférica, definida como alteração indesejável da qualidade do ar, quer nas suas características físicas, químicas ou biológicas, tem consequências nocivas para a sustentabilidade do ambiente e para a saúde humana. A poluição atmosférica contribui para o surgimento de problemas na saúde humana, odores, diminuição da intensidade da luz e diminuição da visibilidade, e pode ter origem em várias fontes, nomeadamente nos processos industriais, deposição de resíduos sólidos, incineração de resíduos, tráfego, entre outros.

O principal agente de poluição atmosférica é o ser humano, sendo que uma das principais atividades que para isso contribuem é a mobilidade. Seja pela utilização de veículos próprios ou pela utilização de transportes públicos, nos dias de hoje, praticamente toda a população mundial contribui para o aumento da poluição atmosférica nos centros urbanos. A evolução da sociedade e dos seus costumes levou as populações a excluïrem do seu quotidiano os meios de transportes tidos como “amigos do ambiente” e, sobretudo, a aumentarem exponencialmente as suas necessidades de deslocação. As deslocações a pé e de bicicleta deixaram de ser eficientes para grandes distâncias e a melhoria do nível económico das famílias induziu as famílias a optarem pela utilização de meios de transporte mais práticos e cómodos: transporte individual (automóveis). A falta de ordenamento do território levou ao crescimento desregulado das cidades com definições conflitantes do uso dos solos. Este crescimento foi acompanhado pelo aumento crescente do investimento em infraestruturas rodoviárias, como forma de atender às “necessidades” das populações. O planeamento de transportes (políticas e infraestruturas rodoviárias) seguia até há bem pouco tempo um modelo racional bem simples que definia objetivos de mobilidade, identificava problemas e gerava alternativas que tinham na maior parte dos casos como resultado prático a construção de mais infraestruturas e consequentemente a geração de mais tráfego e de mais congestionamento. Esse paradigma de planeamento está hoje em mudança, com a tentativa de passagem de modelos de previsão do crescimento da utilização do transporte individual e fornecimento de nova infraestrutura, para modelos que fazem a gestão e planeamento das infraestruturas e serviços no sentido de tornar a mobilidade mais sustentável. Estes novos modelos procuram influenciar o comportamento dos utilizadores para práticas e escolhas mais sustentáveis. É ainda assim uma tarefa difícil, visto que a sociedade atual vê a utilização de veículo próprio

como símbolo de *status* económico e social, apesar do aumento crescente do preço real das viagens de automóvel em comparação com o custo de vida.

1.1 Objetivos e Motivação

A escolha das emissões automóveis em meio urbano para tema da tese de mestrado enquadra-se perfeitamente na temática do curso de Engenharia do Ambiente e nas preocupações da sociedade atual. Poluição atmosférica e qualidade do ar são temas em voga nos dias que correm, quer para a sociedade civil quer para os órgãos de decisão com poder de mudar as práticas existentes. A preocupação pela escolha de um tema atual foi acompanhada pela escolha de técnicas e ferramentas de apoio modernas cuja aplicação aos temas demonstram ter um potencial de crescimento significativo. Neste sentido, a escolha recaiu na micro simulação, uma técnica com larga potencialidade de crescimento. Pretende-se fazer a comparação dos resultados obtidos através deste método com os resultados obtidos pela aplicação de técnicas de macro simulação, mais implementadas no mercado (Ferreira, 2012) tentando validar essas técnicas agregadas e ao mesmo tempo confirmando a possibilidade de análises mais detalhadas com a micro simulação e estabelecendo-a como método de análise e planeamento de futuro. Serão utilizados dois *softwares* comerciais que são os que têm uma fatia maior do mercado, um de micro simulação e um de macro simulação, VISSIM PTV e VISUM PTV, respetivamente. Os dois *softwares* são produtos da mesma empresa: PTV GROUP.

O objetivo último desta dissertação é estimar as emissões automóveis em meio urbano, para um estudo de caso em Coimbra e para o período de ponta da manhã (PPM) através de micro simulação usando o *software* VISSIM PTV, com incorporação de um módulo de estimação de emissões – EnViVer. Os resultados assim obtidos são posteriormente comparados com os resultados obtidos através do *software* de macro simulação, utilizando a metodologia descrita na dissertação de Ferreira, A. (2012).

A estimação das emissões automóveis em meio urbano para o período de ponta da manhã (PPM) será feito em seis fases:

1. Contagem do fluxo de tráfego para o período de ponta da manhã para o estudo de caso;
2. Construção da rede do estudo de caso e modelação por micro simulação do tráfego na hora de ponta da manhã (recurso ao *software* VISSIM PTV);
3. Estimação das emissões automóveis da rede do estudo de caso (recurso à ferramenta do módulo EnViVer);

4. Introdução do fluxo de tráfego na rede que simula o tráfego através de macro simulação recorrendo ao *software* VISUM PTV;
5. Estimação das emissões automóveis do estudo de caso, usando a ferramenta HBEFA;
6. Extração dos resultados obtidos pelos *softwares* e comparação dos resultados obtidos.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos.

No primeiro capítulo – Introdução – é feita uma introdução ao tema da tese. Foram referidos os objetivos que se pretendem alcançar com esta tese de mestrado e a motivação para a escolha do tema a desenvolver. Finalmente, é indicada a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo – Enquadramento e Relevância das Emissões Automóveis – é feito um enquadramento do estudo das emissões e sua relevância, onde se referem os problemas atuais do uso excessivo do automóvel e as consequências que daí advêm. Adicionalmente, são apresentados dados oficiais das emissões automóveis para Portugal.

No terceiro capítulo – Enquadramento dos Modelos para Estimar Emissões Automóveis – são apresentados e descritos os modelos existentes para o cálculo de emissões de poluentes que complementam o modelo estudado durante a dissertação.

No quarto capítulo – Metodologia – são descritos os métodos e modelos utilizados durante a tese de mestrado e descreve-se o estudo de caso. É ainda apresentado o modelo de transportes, o VISSIM PTV, e o módulo para o cálculo das emissões – EnViVer.

No quinto capítulo – Resultados – são apresentados os resultados para o Período de Ponta da Manhã, a rede de emissões representativo das emissões poluentes e um breve resumo dos resultados obtidos.

No sexto capítulo – Conclusões – são apresentadas as principais conclusões do estudo feito no âmbito da dissertação.

2. ENQUADRAMENTO E RELEVÂNCIA DAS EMISSÕES AUTOMÓVEIS

Nos dias atuais, é intenso o debate sobre o efeito de estufa e consequente aquecimento global, tendo como principais responsáveis os sectores da energia e dos transportes. De facto, estes são considerados os responsáveis mais diretos pela emissão de poluentes atmosféricos que têm levado à situação calamitosa em que o Planeta atualmente se encontra.

O Protocolo de Quioto (IPAM, 2013; UN, 2008), assinado por 55 países, constitui um tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas. É um tratado voltado para a redução das emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE). O protocolo foi o resultado de um longo processo de negociações, que envolveram diversos países de todos os continentes. Este processo iniciou-se em 1990, quando o IPCC recomendou a criação de uma convenção que estabelecesse a base para cooperação internacional sobre as questões técnicas e políticas relacionadas com o aquecimento global. A 11 de Dezembro de 1997, em Quioto, foi assinado o documento que define as metas de redução de emissões para os países desenvolvidos, os mais responsáveis pela mudança atual do clima. O Protocolo de Quioto só entrou em vigor a 16 de Fevereiro de 2005, após um período de recrutamento de um número significativo (em número e importância) de países aderentes. O passo decisivo ocorreu com ratificação do acordo pela Rússia. O documento estabelecia, com recurso a um cronograma, que os países aderentes teriam de reduzir a emissão de gases poluentes em 5,2% entre os anos de 2008 e 2012 (primeira fase do acordo). Os gases citados no acordo são: dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrocarbonetos perfluorados e hexafluoreto de enxofre. A redução das emissões deveria acontecer em vários sectores económicos e ambientais. O protocolo incentivava os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas ações básicas:

- Promover o uso de fontes energéticas renováveis (biocombustíveis, energia eólica, biomassa e solar);
- Proteger as florestas e outros sumidouros de carbono;
- Otimizar os sistemas de energia e transporte, visando o consumo racional;
- Limitar as emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos;
- Definição de regras para a emissão dos créditos de carbono (certificados emitidos quando há redução da emissão de gases poluentes).

O Protocolo de Quioto original expirou em 2012. No entanto a 8 de Dezembro de 2012, na 18ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-18), realizada em Doha, no Catar, 194 países aprovaram a prorrogação do período de validade do Protocolo de Quioto até 2020. Há, ainda assim a assinalar que alguns países se desvincularam do acordo. A validade do Protocolo de Kyoto foi confirmada por mais oito anos, mas sem contar com Japão, Rússia, Canadá e Nova Zelândia (TERRA, 2013; UNFCCC ,2013).

Da análise da Figura 1.1 é possível concluir que os níveis de emissão de GEE, entre 1990 e 2007 aumentaram em quase todos os sectores de atividade, exceto no sector da agricultura. No período de 2009 a 2010, apenas os sectores da energia e dos transportes apresentaram uma tendência decrescente, registando uma variação anual de -25% e -1%, respetivamente. O sector dos transportes, onde a dominância é do tráfego rodoviário, regista uma diminuição dos níveis de emissão desde os meados dos anos 2000. Tal fica a dever-se à melhoria da eficiência no sector dos transportes (através da renovação do parque automóvel). Mais recentemente, essa tendência decrescente pode ter origem no aumento do preço dos combustíveis e consequente redução do consumo, e na redução do tráfego de veículos como consequência da grave crise económica em que o país se encontra (APA, 2012).

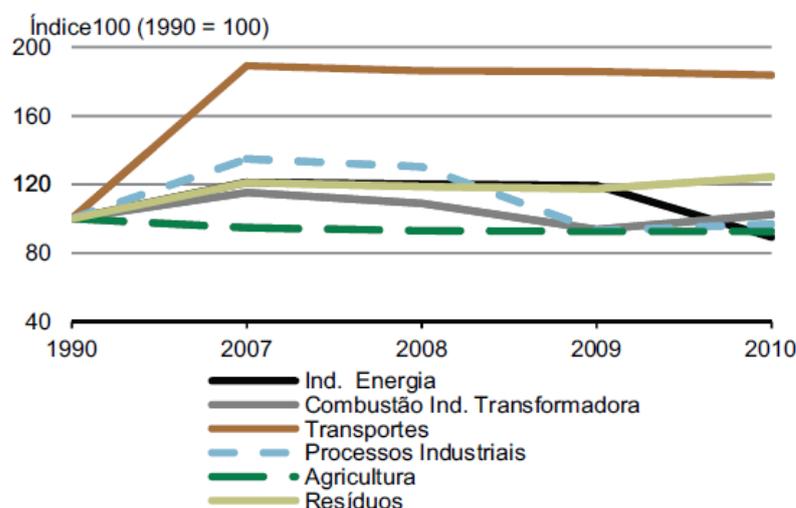


Figura 2.1- Emissão de GEE (sem LULUCF) por sector de emissão, entre 1990 e 2010. (Fonte: INE, I.P., 2012)

Em 2010, no que concerne à repartição das emissões nacionais por sector, verifica-se (Figura 1.2) que 70% das emissões tiveram origem no sector das energias. As emissões de GEE no sector dos transportes têm vindo a diminuir lentamente desde 2002. Embora a taxa de motorização em Portugal continue a aumentar, a adoção progressiva de novas tecnologias e a reformulação da composição dos combustíveis têm permitido reduzir as emissões de GEE e de outros poluentes como o NO₂, os COV, o Pb, o SO₂ e as partículas. Não obstante, este

sector é dos principais emissores de GEE, estimando-se que em 2010 tenha contribuído com cerca de 27% do total das emissões (APA, 2012).

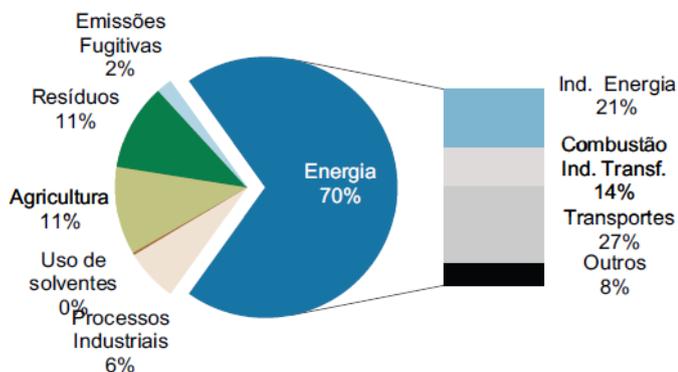


Figura 2.1 - Emissões de GEE (sem LULUCF) por sector de emissão, em 2010. (Fonte: INE, I.P., 2012)

Embora a poluição atmosférica tenha diminuído nas duas últimas décadas, continua a ser um problema grave em muitas zonas. O sector dos transportes é o responsável por mais de um quinto das emissões de GEE. É também responsável por grande parte da poluição atmosférica urbana, bem como pela poluição sonora (AEA, 2012).

A qualidade do ar em áreas urbanas é em muito influenciada pelo tráfego local. Não é por isso de admirar que, com o aumento acentuado do tráfego automóvel, as zonas urbanas se tenham tornado congestionadas e poluídas. Embora os motores dos automóveis estejam em contínua evolução para se tornarem mais eficientes, estas alterações são ainda insignificativas para produzirem uma diminuição considerável do total de emissões.

Segundo o último relatório do Sistema de Relatórios de Transportes e Ambiente (TERM – *Transport and Environment Reporting Mechanism*) da AEA, que avalia o impacto ambiental dos transportes na Europa, o congestionamento de tráfego é um dos fenómenos que tem vindo a agravar as emissões em meio urbano, na medida em que obriga os veículos a estarem parados, a alterações constantes de velocidade ou em processo de pára-arranca (*stop-and-go*), comportamento que tem grande influência sobre as emissões poluentes. As viagens curtas frequentes podem resultar numa maior emissão de gases poluentes por km quando comparadas com as viagens longas em estrada aberta.

Outras características do meio urbano podem aumentar o impacto das emissões do tráfego na qualidade do ar:

- A existência de edifícios altos em ambos os lados da rede viária, comum em muitos centros das cidades, cria o fenómeno *street canyon*, que reduz a dispersão dos

poluentes emitidos pelas fontes de tráfego e pode levar a concentrações locais significativamente mais elevadas (AEA, 2012).

- Determinadas soluções da rede viária como rotundas, semáforos e zonas de portagem têm um efeito negativo na emissão de GEE ao provocarem um aumento significativo das emissões (Coelho et al., 2006; Coelho et al., 2005).
- A topografia das zonas antigas das cidades Portuguesas fortemente marcada por acessos com grandes inclinações. Quanto mais acentuado é o declive numa subida, maiores são as emissões que o carro liberta, já que o motor é sujeito a um maior esforço (Ferreira, 2012).
- O estilo de condução adotado pelo condutor e a interação com os restantes veículos é outro aspeto fundamental a considerar. A adoção de uma postura de condução mais defensiva ou mais agressiva, mais lenta ou mais acelerada, mais pensada ou impulsiva, pode influenciar e muito a emissão de gases poluentes. Perante esta perspetiva fará todo o sentido ter em consideração diferentes perfis de condutores de forma a averiguar se a sua influência é muito significativa, ou não, nas emissões em meio urbano.

Dada a complexidade associada à relação entre os sistemas de tráfego e os fatores de emissões é extremamente importante encontrar ferramentas que nos ajudem a modelar com um certo grau de exatidão o total de emissões, bem como a sua distribuição na rede rodoviária, tornando possível o mapeamento dos níveis de emissões e poluição. Com o recurso a este tipo de mapas é possível quantificar o total de emissões, identificar as populações mais expostas aos gases poluentes e suportar decisões de intervenção das autoridades municipais no sentido de minimizar ou mitigar esses impactes. Estes mapas são produzidos recorrendo a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), com capacidade de cálculo de rotas sobre representações topológicas da rede rodoviária e modelação dos fluxos de tráfego. A modelação pode ser feita com uma escala macro ou micro. Existem diversos *softwares* comerciais disponíveis para o efeito. Entre eles o VISUM PTV e o VISSIM PTV, para macro e micro escala, respetivamente. De acordo com o plano de trabalhos definido para esta tese utilizaram-se os dois *softwares*, o VISSIM PTV para avaliar a potencialidade de aplicação da micro simulação ao estudo de emissões de gases poluentes, e o VISUM PTV para comparar os resultados obtidos pela macro simulação.

3. ENQUADRAMENTO DOS MODELOS PARA ESTIMAR AS EMISSÕES AUTOMÓVEIS

Um modelo é uma representação ou interpretação simplificada da realidade. Os modelos de tráfego, ao permitirem estimar emissões de poluentes e consumo de combustíveis, constituem ferramentas essenciais ao desenvolvimento de linhas de orientação de suporte ao planeamento e à avaliação de novas estratégias. Ao longo dos tempos estes modelos têm evoluído, tornando-se cada vez mais complexos e completos e permitindo uma simulação mais fidedigna das realidades que representam. Um dos aspetos incluídos na nova geração de modelos é a possibilidade de definir a frota circulante com base em veículos pré-definidos ou frotas específicas definidas caso-a-caso. No caso do problema da emissão de gases poluentes, a definição da frota representa uma mais-valia significativa para a obtenção dos valores reais de emissões.

Os modelos podem ser físicos ou matemáticos. Os primeiros estão muito disseminados sendo utilizados para testar soluções de engenharia palpáveis como por exemplo o comportamento de uma ponte. Os segundos surgiram mais recentemente como uma alternativa de representação para problemas não palpáveis como o é a simulação de fluxos de tráfego. Os modelos matemáticos procuram simular o funcionamento de um sistema físico real através de variáveis e das relações (equações) entre variáveis. Os modelos matemáticos variam de escala dependendo do âmbito das decisões que pretendem apoiar, dividindo-se em macro e micro modelos. Os primeiros trabalham com fluxos por hora e os segundos modelam veículo a veículo por segundo.

3.1 Macro Simulação

Os macro modelos de transportes são usados para prever o estado e evolução do sistema de transportes na ausência de políticas de intervenção (permitem-nos perceber de que forma o sistema poderá evoluir se nada for feito), testar a performance de uma dada intervenção em cada um de vários cenários imaginados (permitem-nos avaliar a robustez das intervenção face à incerteza futura) e prever o estado e evolução do sistema de transportes devido à implementação de uma determinada configuração do sistema ou política de transportes. Os macro modelos permitem ainda perceber quais os benefícios introduzidos por cada componente e avaliar o balanço custo-benefício de cada uma delas.

A maioria dos estudos de transportes que inclui modelação da procura utiliza uma abordagem consolidada no final dos anos 60 que se baseia no denominado: Modelo Clássico dos Transportes ou Modelos dos 4 passos. Este é um modelo macro que trata conjuntos de viagens

e é usado quando se pretende avaliar impactes sobre o sistema de transportes resultantes de intervenções ou alterações tanto no sistema de transportes como nos usos do solo de uma determinada região assim como de alterações socioeconómicas da população. O paradigma subjacente é o da representação eficaz das determinantes do desejo de mobilidade e da escolha das soluções para essa mobilidade através de um conjunto de equações matemáticas. Na figura 3.1 é apresentado o esquema geral do modelo dos 4 passos.

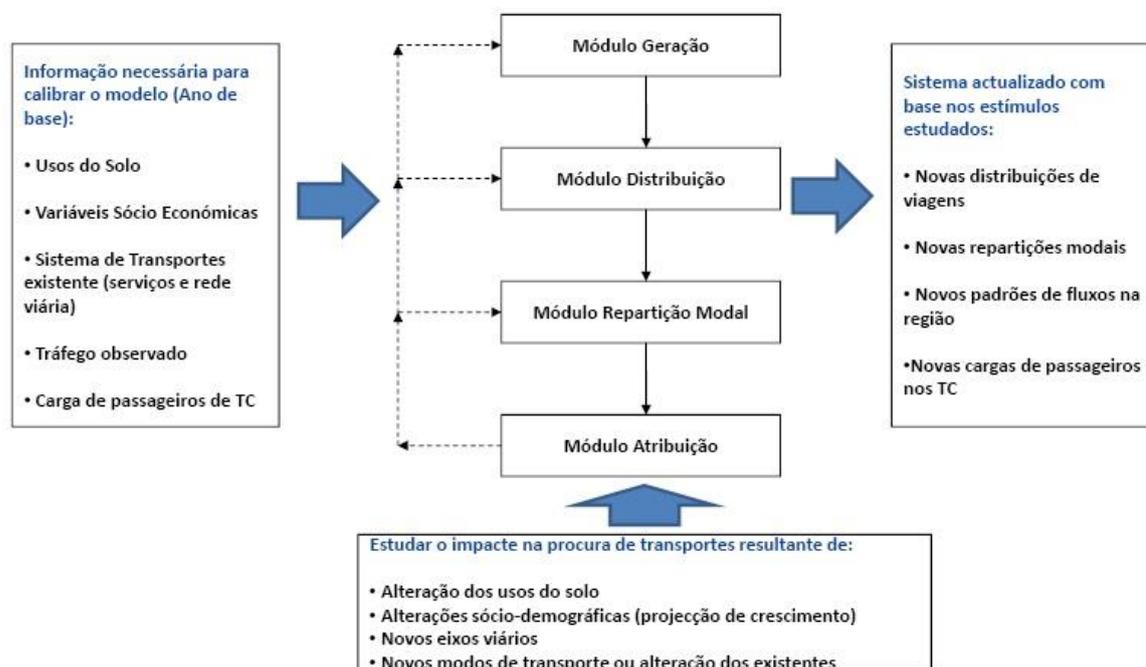


Figura 3.1 - Esquema geral do modelo dos 4 passos (Correia, 2013).

Os modelos macros, apesar da evolução sofrida no sentido de captarem cada vez melhor a realidade dos sistemas de Transporte, falham na análise concreta de muitos problemas. Com efeito, não permitem analisar em pormenor o funcionamento de um cruzamento, ou modelar um sistema de transportes coletivos passageiro a passageiro. O aumento de escala é necessário para os níveis tático e operacional de planeamento de transportes e por isso são os modelos que têm sofrido maior evolução nos últimos anos (Correia, 2013).

Apesar das críticas que se colocam ao modelo dos 4 Passos, nomeadamente o facto de modelar viagens agregadas por intervalo de tempo e não construir uma relação lógica entre as viagens num instante e as do próximo, este modelo continua a ser a melhor ferramenta disponível para Planeamento de Transportes na maioria das áreas urbanas do mundo.

3.1.1 Software VISUM PTV

O VISUM é um *software* para o planeamento de transportes, modelação da procura de viagens e gestão de redes de transportes. Esta ferramenta baseia-se no modelo clássico dos quatro passos.

3.2 Micro Simulação

A micro simulação de tráfego é uma técnica que modela cada veículo e a sua interação com a rede viária, permitindo avaliar o impacto de alterações de tráfego em função de alterações de comportamento dos condutores ou alterações físicas na rede. É especialmente útil para avaliar condições limite de congestionamento tendo incorporados modelos de filas de espera e de comportamento do condutor. Pode ser classificada como um tipo de modelação por agentes em que cada veículo é um agente com determinado comportamento regido por regras probabilísticas, nomeadamente velocidades, distância ao veículo da frente, decisões de mudança de pista, etc.

A micro simulação de tráfego baseia-se em matrizes OD locais, estimadas, por exemplo, com recurso a técnicas de contagem. Uma vez que tem por objetivo a caracterização de um elemento específico da rede, dispensa o conhecimento das matrizes OD de todo o espaço urbano envolvente. Apesar de atrativa, a micro simulação não serve, em geral, de suporte para decisões estratégicas, sendo mais indicada para decisões ao nível operacional.

3.2.1 Software VISSIM PTV

O VISSIM é um instrumento de planeamento microscópico que utiliza um modelo de simulação baseado no comportamento e no tempo para simular (ou representar) o tráfego urbano, operações de transporte público e fluxo de pedestres.

O programa permite analisar as operações do transporte individual e coletivo sob restrições tais como a configuração da rede rodoviária, composição do veículo, semáforos, paragens de transportes públicos, etc. É assim, uma ferramenta útil para a avaliação de várias alternativas com base na engenharia de transportes e medidas eficientes para o planeamento. Nesse sentido, também os fluxos de pedestres podem ser modelados, em exclusividade ou combinados com os transportes individuais e/ou transportes públicos (VISSIM User Manual, 2012).

3.2.1.1 Modelos de Simulação de Tráfego

O pacote de simulação do VISSIM PTV (Figura 4.1) divide-se internamente em duas partes, troca do detetor de chamadas e o estado do sinal através de uma interface. A simulação gera

uma visualização *online* de operações de tráfego e gera *offline* os arquivos de saída recolhidos de dados estatísticos como o comprimento da rede rodoviária e tempos de viagem.

O simulador de tráfego é um modelo de simulação de fluxo de tráfego microscópico que inclui o comportamento perante o carro seguinte e a lógica de mudança de pista. O gerador do estado do sinal é um *software* de controlo de sinal de sondagem da informação do detetor do simulador de tráfego com base no passo de tempo discreto (até 1/10 de segundo). Ele determina o estado do sinal do tempo para a etapa seguinte e retorna essa informação para o simulador de tráfego.

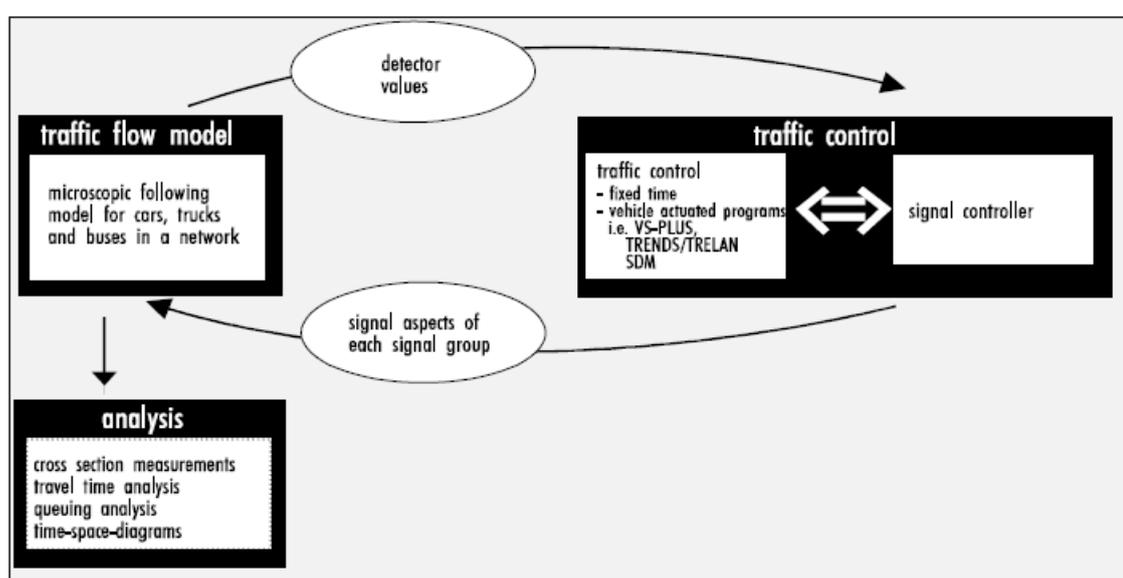


Figura 3.2 - Comunicação entre o simulador de tráfego e o gerador do estado de sinal (Fonte: VISSIM User Manual, 2012).

A precisão de um modelo de simulação de tráfego depende principalmente da qualidade de modelação do veículo, por exemplo, a metodologia de veículos que se deslocam na rede. Em contraste com os modelos menos complexos que usam velocidades constantes e a lógica do seguimento dos veículos do tipo determinística, o VISSIM usa o modelo de comportamento físico e psicológico do condutor desenvolvido por Wiedemann (1974), conforme a figura 3.2 nos mostra.

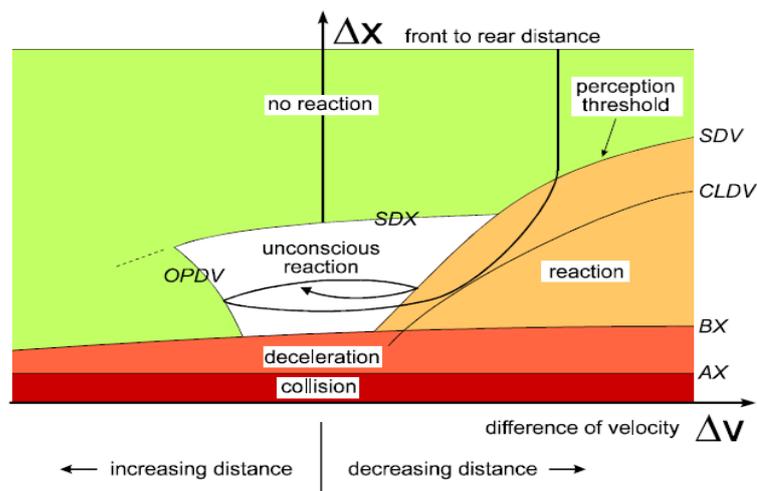


Figura 3.3 - Car following logic, segundo Wiedemann (1974) (Fonte: VISSIM User Manual, 2012).

As distribuições estocásticas de velocidade e limites de espaçamento reproduzem as características do comportamento do condutor. O modelo foi calibrado por meio de várias medições de campo na *Technical University of Karlsruhe* (Alemanha), desde 2009. As medições de campo periódicas e as suas atualizações, resultantes dos parâmetros do modelo certificam que as alterações na melhoria do comportamento do condutor e veículo são contabilizadas.

O simulador de tráfego do *software* VISSIM PTV não só permite que os condutores de rodovias com múltiplas vias reajam aos veículos anteriores (4 por defeito), mas também aos veículos vizinhos que se deslocam nas pistas adjacentes. Além disso, a aproximação a um sinal de trânsito resulta num maior estado de alerta para os condutores a uma distância de 100 metros na frente da linha de paragem.

O VISSIM PTV simula o tráfego movendo *driver-vehicle-units* através da rede. É atribuído a cada condutor um veículo específico tendo em conta as características específicas do condutor. Como consequência, o comportamento do condutor corresponde às capacidades técnicas do seu veículo. Os atributos que caracterizam cada unidade de veículo podem ser discriminados em três categorias:

- Especificações técnicas do veículo, que podem ser o comprimento, a velocidade máxima, o potencial de aceleração, a posição real na rede e a aceleração atual e a velocidade real;
- Comportamento dos condutores, que tem em conta os limiares da sensibilidade psicológica e física do condutor (estimar a habilidade, agressividade), a memória do

condutor e a aceleração com base na velocidade atual e a velocidade que o condutor deseja;

- Interdependência dos *driver-vehicle-units*, que faz referência aos veículos seguintes e em vias adjacentes e também às vias atuais, próximas intersecções e próximo sinal de trânsito.

3.2.1.2 Abordagem de “Wiedemann”

O modelo de fluxo de tráfego utilizado pelo VISSIM é discreto, estocástico, baseia-se em intervalos de tempo, e trata-se de um modelo microscópico com *driver-vehicle-units* como entidades individuais. Contém ainda um modelo psicofísico do *car following* para o movimento longitudinal do veículo e um algoritmo baseado em regras para os movimentos laterais. O modelo baseia-se no trabalho contínuo de Wiedemann:

- Wiedemann, R (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (since 2009 KIT - Karlsruher Institut für Technologie), Heft 8
- Wiedemann, R. (1991). Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads. In: Advanced Telematics in Road Transport edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels

A ideia básica do modelo de Wiedemann é a suposição de que um condutor pode estar em um dos quatro modos de condução:

- *Free driving*: Não influencia a observação dos veículos anteriores. Neste modo, o motorista procura alcançar e manter uma certa velocidade, a velocidade desejada individualmente. Na realidade, a velocidade de condução livre não pode ser mantida constante, mas oscila em torno da velocidade desejada, devido ao controlo do acelerador imperfeito (a menos que o veículo possua *Cruise Control*).
- *Approaching*: O processo de adaptação própria velocidade do motorista para a velocidade mais baixa de um veículo anterior. Quando se aproxima, o condutor aplica uma desaceleração de modo que a diferença entre os dois veículos de velocidade seja igual a zero, no momento em que ele atinge a sua distância de segurança desejada.
- *Following*: O motorista segue o carro anterior, com velocidade constante (sem aceleração ou desaceleração consciente). Ele mantém a distância de segurança, mais ou menos constante, mas, mais uma vez, devido ao controlo inconstante do acelerador a diferença de velocidade oscila em torno de zero.

- *Braking*: corresponde a períodos de desaceleração mais bruscos, normalmente coincidentes com fases em que a distância entre veículos cai abaixo da distância de segurança desejada. Ocorre aquando das mudanças de via dos carros na vizinhança ou quando o veículo da frente reduz a velocidade abruptamente.

Para cada modo, a aceleração é descrita em função da velocidade, da diferença de velocidade, da distância e das características individuais do condutor e do veículo. O condutor muda de um modo para outro ao atingir um certo limite que pode ser expresso como uma combinação da diferença de velocidade e distância. A capacidade de perceber diferenças de velocidade, de estimar distâncias de segurança e de reação perante os restantes veículos varia de condutor para condutor. Devido à combinação de aspetos psicológicos e restrições fisiológicas de perceção do condutor, o modelo é chamado um modelo psicofísico do *car following*.

3.3 Modelos de Estimação de emissões automóveis

3.3.1 Modelos para macro Simulação

3.3.1.1 HBEFA

As previsões das emissões automóveis e de consumo de combustível são cada vez mais importantes para a avaliação de políticas ambientais e para decisões de investimento em infraestruturas de transporte. No âmbito da importância crescente das emissões poluentes, o *software* VISUM PTV integrou na sua plataforma em Fevereiro de 2010 um modelo que fornece o cálculo de emissões com base no chamado HBEFA (*HandBook Emission Factor for road transport – Manual de fatores de emissão para o transporte rodoviário*) (PTV GROUP VISUM, 2013; INFRAS, 2013). Trata-se de um repositório de coeficientes que relacionam as emissões de vários poluentes com as várias categorias de veículos (veículos de passageiros, veículos comerciais ligeiros, camiões, autocarros turísticos, transportes públicos e motos) em diversas condições de circulação.

A Figura 3.2 clarifica o modo de funcionamento desta metodologia: dado o sistema de transportes, o volume de tráfego e as suas condições de circulação nomeadamente velocidade, rácio de volume sobre a capacidade e inclinação e tendo em consideração uma frota de referência o cálculo das emissões para cada tipo de veículo segue uma equação muito simples:

$$Emissão(g/km) = Volume\ de\ Tráfego(veíc) * Factor\ de\ Emissão\left(\frac{g}{veíc.km}\right) \quad (1)$$

Onde:

Emissão (g/km) – massa total de um tipo de poluente, tal como o CO₂ ou NO_x emitido pelos veículos sobre um arco num comprimento de um km durante um determinado período de tempo;

Volume de Tráfego (veíc) – número de veículos que atravessam o arco durante esse intervalo de tempo.

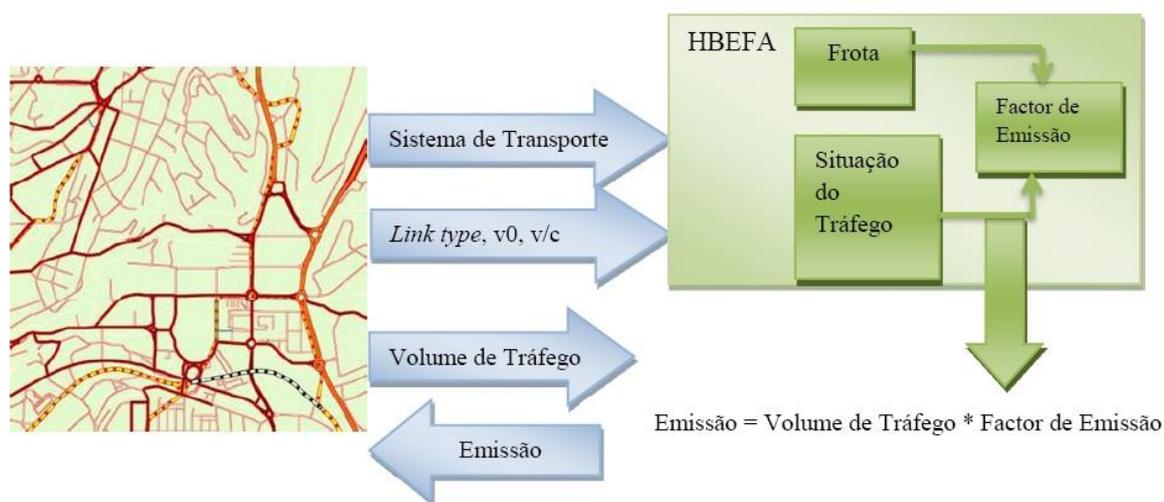


Figura 3.4 – Ligação entre VISUM e HBEFA (Fonte: Ferreira, 2012)

Os modelos típicos permitem distinguir um número muito restrito de tipo de veículos, simplificando por vezes em carros e camiões, fazendo com que o cálculo de emissões fique demasiado agregado. O HBEFA dispõe de um conjunto de composições de frota prédefinidas que caracterizam a realidade de diversos países e diversos anos. Está nestas condições a Áustria, com uma base de dados de frota abrangendo os anos de 1990 até 2013. Os países não contemplados pelo HBEFA, como é o caso de Portugal, ou para cenários específicos, o *software* dá a possibilidade de transferir uma frota como ponto de partida e de seguida modificá-la (VISUM Status and Perspectives User Manual, 2010).

O HBEFA é baseado em fatores de emissão de referência para as diferentes categorias de veículos. Cada fator de emissão está associado a uma situação de tráfego particular e caracteriza-se pelos atributos da secção em questão ou do tipo de estrada (autoestrada, acesso residencial, entre outras). Apesar do utilizador não poder especificar os detalhes das condições de trânsito, os cenários construídos para o modelo são acessíveis através de uma série de critérios de seleção (Boulter e Latham, 2009).

Os fatores de emissão dependem não só do tipo de veículo, mas também da situação de trânsito em que o veículo se encontra. Em termos de emissão, travar a 100km/h numa autoestrada é completamente diferente do pára-arranca típico dos semáforos ou de uma fila de trânsito numa rua movimentada da cidade. O HBEFA capta estas diferenças de emissão consoante situações referidas e recomendadas pelo ARTEMIS.

Neste modelo estão incluídos os principais poluentes regulamentados, os principais poluentes não regulamentados e o consumo de diversos tipos de combustível. O HBEFA é complementado por outros modelos, nomeadamente o COPERT (*Computer Program to calculate Emissions from Road Traffic*), ARTEMIS (*Assessment and Reliability of Transport Emissions Models and Inventory Systems*) e o PHEM (*Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model*) (Brzowski, 2006; VISUM Status and Perspectives User Manual, 2010; GUT, 2009).

As emissões produzidas ao nível de cada arco principal são divididas em três grupos:

- HBEFA grupo 1 – Programas de medição estabelecidos;
- HBEFA grupo 2 – Programas complementares de medição e literatura;
- HBEFA grupo 3 – Indicativos com referência à literatura.

Os efeitos que cada poluente causa e a sua fonte são bastante diferentes. É possível dividir os poluentes em dois tipos de acordo com os diferentes modos em que estes são gerados (QUALAR, 2013):

- Poluentes primários – são emitidos diretamente da fonte para a atmosfera (por exemplo, os gases que provêm do tubo de escape de um veículo automóvel). Como exemplo, temos o monóxido de carbono, os óxidos de azoto constituídos pelo monóxido de azoto e pelo dióxido de azoto, dióxido de enxofre ou partículas em suspensão;
- Poluentes secundários – resultam de reações químicas que ocorrem na atmosfera e onde participam alguns poluentes primários.

Para o cálculo total das emissões, além das emissões a quente (durante a fase termicamente estável de operação do motor), também são consideradas as emissões a frio (referentes aos primeiros quilómetros). As emissões a frio são frequentemente ignoradas ou colocadas de parte, porque a contagem do tráfego normal pode ser realizada por tipo de veículo, mas não pelo tempo que o carro demora a aquecer. As versões mais recentes de *softwares* tal como o VISUM, permitem armazenar a trajetória completa para uma determinada viagem, por isso,

invertendo esses dados, é possível dizer qual a fração do volume, num determinado arco, que corresponde aos primeiros metros da viagem (VISUM Status and Perspectives User Manual, 2010).

As emissões que decorrem na fase do aquecimento do motor têm, muitas vezes, concentrações mais elevadas do que as emissões quando o motor está termicamente estável, sendo esta a diferença entre as emissões a frio a as emissões a quente.

Em praticamente todos os modelos de emissão de transporte rodoviário, as emissões são associadas ao comprimento total da viagem somando-se as emissões de três fontes diferentes:

- Emissões decorrentes da operação de aquecimento do motor na fase de arranque (emissões a frio);
- Emissões produzidas quando o motor já está numa fase termicamente estável de operação (emissões a quente);
- Emissões provenientes da evaporação do combustível (são apenas relevantes para as espécies de COVNM dos veículos movidos a gasolina).

Desta forma, as emissões totais podem ser calculadas através da equação 2:

$$E_{Total} = E_{Frio} + E_{Quente} + E_{Evap} \quad (2)$$

Onde,

E_{Total} – emissões totais (g) de um qualquer poluente para a resolução temporal e espacial da aplicação;

E_{Frio} – emissões (g) durante a operação de aquecimento do motor (emissões a frio);

E_{Quente} – emissões (g) durante a fase termicamente estável da operação do motor (emissões a quente);

E_{vap} – emissões (g) provenientes da evaporação do combustível.

3.3.1.2 COPERT

O COPERT (Emisia, 2013) é um *user-friendly MS Windows software*, usado mundialmente para o cálculo das emissões poluentes atmosféricos provenientes do transporte rodoviário. O seu desenvolvimento é coordenado pela Agência Europeia do Ambiente (AEA), no âmbito das atividades do Centro Temático Europeu para a Poluição do Ar e mitigação das mudanças

climáticas (*European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation*). A Comissão Europeia, através do *Joint Research Centre*, controla o desenvolvimento científico do modelo. O COPERT foi desenvolvido para a elaboração do inventário oficial de emissões do transporte rodoviário dos Estados Membros, mas, é aplicável em todas as pesquisas relevantes, sejam científicas ou académicas.

A metodologia seguida pelo COPERT faz parte do Guia do Inventário das Emissões de Poluentes Atmosféricos EMEP/EEA (*European Modeling and Evaluation Programme/ European Environment Agency*) e é consistente com as Diretrizes do IPCC 2006 para o cálculo das emissões GEE.

O modelo abrange os principais poluentes atmosféricos, dividindo-os em quatro grupos:

- Poluentes para os quais existe metodologia detalhada, baseada em fatores de emissão específicos e que cobrem diferentes situações de tráfego e condições de motor – monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x, NO e NO₂), compostos orgânicos voláteis (COV), metano (CH₄), compostos orgânicos voláteis não-metânicos (COVNM) e partículas em suspensão (PM);
- Poluentes com origem nas emissões dependentes do consumo de combustível – dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), chumbo (Pb), cádmio (Cd), crómio (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), selénio (Se) e zinco (Zn);
- Poluentes com falta de informação detalhada, aplicando-se uma metodologia simplificada – amónia (NH₃), óxido nitroso (N₂O), hidrocarbonetos aromáticos (HAPs) e poluentes orgânicos persistentes (POPs);
- Poluentes que são uma fração dos COVNM – alcanos, alcenos, alcinos, aldeídos, cetonas, ciclo alcanos e aromáticos.

O COPERT, tal como o HBEFA, tem em conta três meios de circulação (Urbano, Rural e Autoestrada), distingue as emissões em três tipos:

- Emissões a quente – emissões durante a fase termicamente estável de operação do motor;
- Emissões a frio – emissões durante a operação de aquecimento do motor;
- Emissões evaporativas – emissões provenientes da evaporação do combustível, sendo estas apenas relevantes para as espécies de COVNM dos veículos movidos a gasolina.

Os meios de circulação impõem diferentes condições do motor, e conseqüentemente, desempenhos de emissões distintos. As variáveis de entrada do COPERT são aquelas relacionadas com o combustível (consumo, especificação por tipo de combustível), e com os dados de atividade (número de veículos por cada categoria de veículos, distribuição da frota de veículos nas diferentes classes de legislação de emissão, quilometragem por classe de veículo e quilometragem por tipo de estrada). Como dados de entrada são ainda introduzidos, a título de exemplo, as velocidades médias por tipo de estrada e as temperaturas máxima e mínima correspondentes ao período em estudo.

3.3.2 Modelos para Micro Simulação

3.3.2.1 EnViVer / VERSIT +

O modelo de emissões VERSIT + foi desenvolvido pela empresa TNO com vista à previsão de emissões de veículos em situações de tráfego particulares e baseia-se em 15.000 medições de veículos de diferentes marcas e modelos em laboratório.

O VERSIT + consiste num modelo estatístico de previsão de fatores de emissões que são representativos para frotas de veículos e tecnologias específicas de diferentes países (por exemplo, normas europeias, combustíveis, tecnologia de injeção dos motores, etc.). Os dados de emissão que constam da base de dados baseiam-se num procedimento de testes com homologação europeia (ciclo de testes *MVEG-B* para veículos de passageiros e *ESC* para camiões), mas também em uma ampla variedade de condições do mundo real, como engarrafamentos, rotundas, rodovias com tráfego congestionado, etc.. Além disso, foi analisada a influência de diferentes estilos de condução. Finalmente, o *software* de modelação integra ainda os efeitos do aquecimento dos motores, do envelhecimento (por exemplo, a utilização do ar condicionado e as emissões de partículas causadas pelo desgaste dos pneus e travões) (EnViVer 3.6 *Pro and Enterprise User Manual*, 2011).

Os fatores de emissão são específicos de cada tipo de veículo e das situações de trânsito, tendo ainda em conta situações reais de condução. O VERSIT + é o único modelo que produz resultados consistentes em escalas nacionais, regionais e locais. Ele pode ser usado para investigar estratégias nacionais de redução de gases de efeito de estufa, mas também para a melhoria da qualidade do ar local.

O factor de emissão em g / km, resulta então da divisão das emissões produzidas em testes laboratoriais pelo número de quilómetros nesse mesmo teste:

$$EF[g / km] = \frac{EM[g]}{dist[km]} \quad (3)$$

Os fatores de emissão são usados por organizações públicas e privadas para a monitorização ambiental, bem como para a avaliação dos efeitos ambientais de medidas de tráfego e incentivos tecnologia de veículos.

As emissões por carro podem variar amplamente, devido a diferenças na tecnologia dos veículos e comportamento de condução. O VERSIT + baseia-se numa base de dados de 12.000 ciclos de condução medidos, imitando todos os aspetos do comportamento de condução em tempo real. Recorrendo a técnicas avançadas de modelagem estatística, o VERSIT + encontra a melhor equação de factor de emissão para qualquer condução padrão dada.

O mais recente desenvolvimento associa o VERSIT + diretamente a modelos de simulação de tráfego. Isto permite a avaliação direta do impacto das medidas de tráfego sobre a qualidade do ar. Esta é uma informação vital para os governos locais na luta contra a poluição do ar local.

Com base nas normas europeias de emissões de veículos (*Euro Classes*), a modelação de emissões é dividida em duas categorias principais:

- LD - automóveis de passageiros e veículos comerciais ligeiros, ou seja, veículos leves;
- HD - camiões e autocarros, ou seja, os veículos pesados.

O *software* VERSIT + LD modela a emissão de gases baseado numa base de dados com 12.000 mensurações que relacionam as emissões com a tecnologia dos veículos, tipo de estrada e comportamento dos condutores. A tecnologia do veículo é dividida em mais de 80 categorias diferentes de veículos tendo em conta os seguintes aspetos: *Euro Class*, mudanças manuais ou automáticas e tecnologia de injeção. A modelação do comportamento dos condutores é complexa e difícil de modelar, dependendo, por exemplo, do limite de velocidade, do grau de congestionamento, da variação de estilos de condução e de muitos outros fatores tais como a potência do motor. Os modelos VERSIT + LD usam uma combinação de velocidade e aceleração, que descrevem a dinâmica do comportamento de condução para calcular as emissões (EnViVer 3.6 Pro and Enterprise User Manual, 2011; Ligterink e De Lange , 2009).

O *software* VERSIT + HD também foi desenvolvido pela TNO e baseia-se, em parte, no modelo PHEM que foi desenvolvido pela TU Graz e TNO como parte de uma colaboração europeia. Este modelo simula as emissões de camiões e autocarros, com base em padrões de condução, parâmetros do veículo (por exemplo, massa e energia) e mapas médios de emissões de motores. O comportamento de condução, especialmente para camiões de pesados, é muito

mais limitado. Por outro lado, as emissões de veículos pesados dependem do peso da carga. Um autocarro moderno pode pesar até 12 toneladas, ao qual se acresce o peso do número máximo de pessoas que pode transportar, alterando assim o seu peso bruto. Este fato muda a dinâmica de condução e as emissões (EnViVer 3.6 Pro and Enterprise User Manual, 2011).

O perfil de velocidade, definido como a velocidade do veículo num determinado período, não é o único factor determinante das emissões. Se o motor de um veículo está frio ou o veículo se locomover em marcha lenta durante um longo tempo, as emissões podem ser afetadas significativamente. Ainda assim, a principal emissão pode ser prevista com base no perfil de velocidade. Isso é feito em uma versão agregada do modelo VERSIT +, com tipos de veículos médios nas principais categorias. Este modelo designa-se Versit + ^{micro}.

O VERSIT + ^{micro} é um modelo estatístico capaz de calcular as emissões de CO₂, NO_x e PM₁₀ consoante as categorias de veículos. Os cálculos de emissão são feitos com base nos perfis de velocidade-tempo dos veículos. As emissões automóveis dependem de dois parâmetros principais, a velocidade do veículo e parâmetros especiais desenvolvidos para descrever a dinâmica dos veículos.

O VERSIT + ^{micro} considera quatro categorias principais de veículos, são elas:

- *Light Duty vehicles;*
- *Buses;*
- *Heavy Duty Medium;*
- *Heavy Duty Heavy.*

A aplicação específica do VERSIT + ^{micro} para o cálculo das emissões de gases poluentes, desenvolvida com base nos dados do registo de tráfego simuladas no VISSIM, é conhecida como EnViVer (PTV GROUP VISSIM, 2013).

Existem duas versões do EnViVer disponíveis:

- EnViVer Pro
- EnViVer Enterprise

Os modelos e cálculos dentro EnViVer Pro e EnViVer Enterprise são exatamente os mesmos. Porém, o EnViVer Enterprise é mais flexível e oferece uma série de recursos adicionais em comparação com EnViVer Pro.

O EnViVer calcula os valores de emissão dos veículos com base em dados de tráfego rodoviário simulados e algoritmos de cálculo com os parâmetros de acompanhamento do modelo VERSIT + ^{micro} desenvolvido pela TNO. O EnViVer baseia-se na emissão microscópica de gases do modelo VERSIT + ^{micro} e tem como base as medições efetuadas pela empresa. Essas medições são referentes aos níveis de emissão de mais de 3000 carros, testados em diversas condições de condução. O EnViVer importa os arquivos de registos dos fluxos de veículos do VISSIM PTV e tem a capacidade de modelar as emissões de CO₂, NO_x e partículas PM₁₀, para praticamente qualquer tipo de carro da área de estudo. Para tal, necessita de informação sobre o comportamento dos veículos (perfil de velocidade-tempo), a qual está disponível no *software* de simulação de tráfego. Desta forma o EnViVer permite calcular o impacto das emissões nos diversos elementos das redes rodoviárias, tais como autoestradas, rotundas, etc., fazendo ainda o gerenciamento do tráfego dinâmico sobre as emissões (TNO, 2013). Estes resultados podem ser visualizados sob a forma de tabela ou gráfico. Outro modelo de micro simulação que também recorre ao VERSIT + para o cálculo das emissões automóveis é o *software* Aimsun.

4. METODOLOGIA

Para a estimação de emissões automóveis em meio urbano (objetivo geral da tese) recorreu-se a uma ferramenta de simulação microscópica para modelação de fluxos de tráfego multimodais, o *software* VISSIM PTV. Este *software* possui as condições ideais para simular o tráfego em diferentes cenários de teste de uma forma realista e altamente detalhada antes da implementação final.

A primeira parte do trabalho consistiu na aprendizagem do *software* VISSIM PTV e dos conceitos a ele associados. Posteriormente, foi necessário entender o módulo de emissões que o VISSIM PTV integra, o módulo EnViVer Pro, e a forma como este se encontra configurado no programa.

4.1 Estudo de caso

Escolheu-se como estudo de caso a cidade de Coimbra, em particular a Avenida Dom Afonso Henriques. Notar que sendo o objeto de estudo desta dissertação a micro simulação, a análise nunca poderia recair sobre toda a cidade já que isso exigiria maior capacidade de cálculo e ao mesmo tempo dados muito detalhados de volumes e rotas usadas pelos veículos.

Coimbra é uma cidade portuguesa, capital do Distrito de Coimbra, a maior cidade da Região Centro de Portugal e situada na sub-região do Baixo Mondego, com 143 396 habitantes de acordo com os Censos de 2011. Coimbra é ainda sede do município, com o mesmo nome, com uma área de 319,41 Km². É a cidade berço da primeira Universidade Portuguesa, a Universidade de Coimbra, contando atualmente com cerca de 30 mil estudantes (Censos, 2011).

4.2 Contagens

A implementação da metodologia inerente ao *software* VISSIM PTV exige a representação simplificada da área de estudo e a obtenção de dados representativos dos fluxos de tráfego da área. Os dados de fluxo de tráfego foram obtidos através de contagem no local para o Período de Ponta da Manhã (PPM) (Figura 4.1).

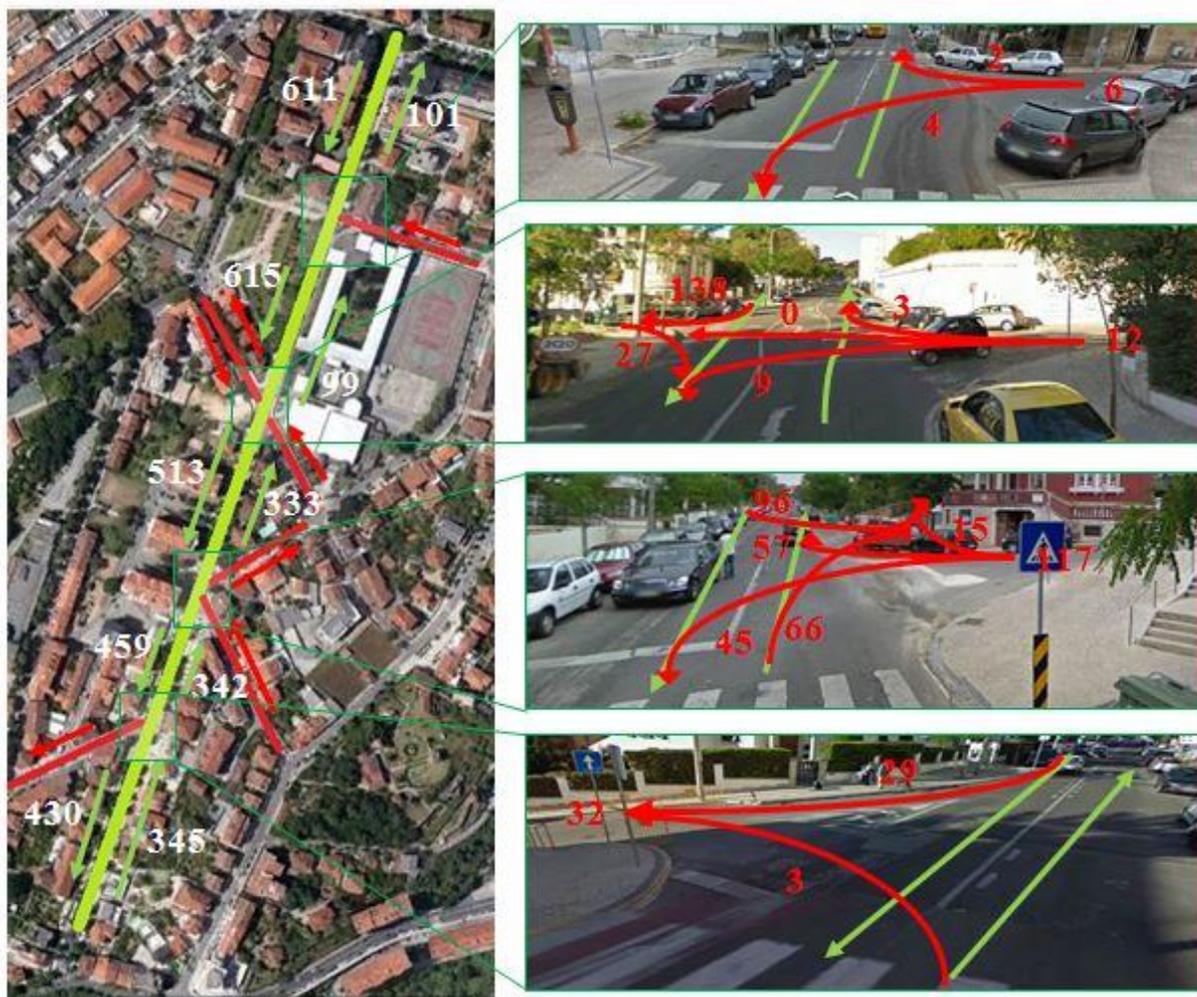


Figura 4.1 – Representação dos fluxos de tráfego da rede para o PPM.

4.3 Utilização do Software VISSIM PTV

4.3.1 Parâmetros para a simulação

O tráfego tem uma natureza intrinsecamente estocástica que necessita de ser incorporada nos modelos VISSIM. O modelo do *car following* de Wiedemann, lida com essa variabilidade, incorporando vários parâmetros que usam distribuições estocásticas.

4.3.1.1 Funções de aceleração e desaceleração

O VISSIM não utiliza um valor único para a aceleração e desaceleração, mas sim funções de aceleração e desaceleração que representam diferentes comportamentos do condutor.

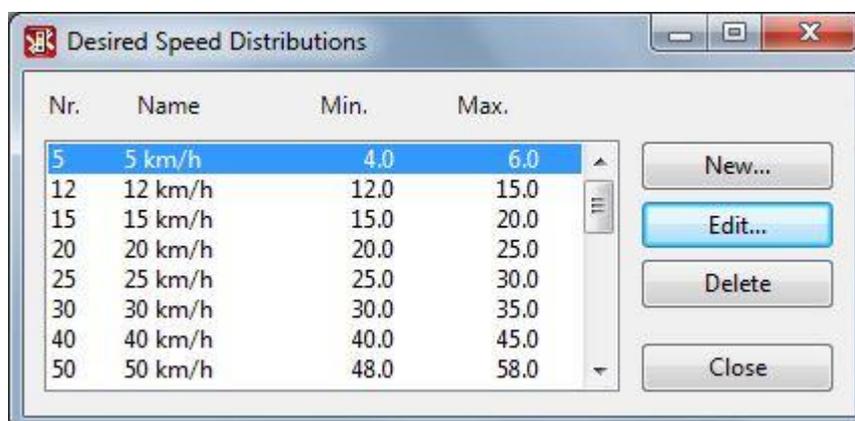
Para cada tipo de veículo é necessário atribuir duas funções de aceleração e duas funções de desaceleração (estas funções já estão incorporadas no *software*):

- Aceleração máxima – corresponde ao máximo valor de aceleração tecnicamente viável. Só é considerada se for necessária uma aceleração suplementar nos declives para manter a velocidade constante. Nesses casos, a aceleração sofre uma redução de $0,1 \text{ m/s}^2$ por 1% para declives positivos e um aumento de $0,1 \text{ m/s}^2$ por 1% para declives negativos;
- Aceleração desejada – Usada para qualquer outra situação;
- Desaceleração máxima – corresponde ao máximo valor de desaceleração tecnicamente viável. Só é considerada se for necessária uma desaceleração suplementar nos declives para manter a velocidade constante. Nesses casos, a desaceleração sofre um aumento de $0,1 \text{ m/s}^2$ por 1% para declives positivos e uma redução de $0,1 \text{ m/s}^2$ por 1% para declives negativos;
- Desaceleração desejada – Se for menor que a desaceleração máxima, então a desaceleração desejada é usada como o máximo para a desaceleração.

4.3.1.2 Distribuição

O VISSIM define uma gama de parâmetros com base numa distribuição, em vez de utilizar valores fixos. Desta forma, a natureza estocástica do tráfego é refletida realisticamente.

A distribuição de velocidades para qualquer tipo de veículo é um parâmetro importante que depende da capacidade da rodovia e da velocidade de viagem possível. Para cada tipo e composição de veículos define-se uma distribuição estocástica de velocidade. Para tal consideraram-se os valores padrão do *software* VISSIM (Figura 4.2), em que para cada velocidade selecionada para um *link*, o veículo irá circular entre uma velocidade mínima e uma máxima (por exemplo, se se selecionar 50 km/h quer dizer que esse veículo poderá circular entre 48 km/h e 58 km/h).



Nr.	Name	Min.	Max.
5	5 km/h	4.0	6.0
12	12 km/h	12.0	15.0
15	15 km/h	15.0	20.0
20	20 km/h	20.0	25.0
25	25 km/h	25.0	30.0
30	30 km/h	30.0	35.0
40	40 km/h	40.0	45.0
50	50 km/h	48.0	58.0

Figura 4.2 – Janela das características das Distribuições das Velocidades Desejadas.

O modelo de distribuição, para além da distribuição da velocidade desejada, define também a variedade de dimensões, cores e textura que é necessário para a visualização gráfica (propriedades do veículo dentro de um tipo de veículo). As dimensões, em particular, têm efeito sobre os resultados da simulação, por exemplo, devido ao comprimento e largura dos veículos. Quer para as dimensões, quer para as cores e texturas dos veículos foram utilizados valores padrão.

4.3.1.3 Tipo de veículo, Classe e Categoria

O VISSIM utiliza um conceito hierárquico para definir e fornecer informação do veículo em diferentes níveis em toda a aplicação. A tabela 4.1 mostra os níveis individuais.

Tipo de veículos	Grupo de veículos com características técnicas e comportamentos de condução físicos semelhantes. Normalmente os tipos de veículos existentes são: Automóvel, LGV (veículo ligeiro de mercadorias), HGV (veículo pesado de mercadorias), autocarro, autocarro articulado, elétrico, bicicleta e pedestre.
Classe de veículos	Um ou mais tipos de veículos são combinados numa classe de veículos. Por defeito, uma classe de veículos refere-se a um tipo de veículos com o nome semelhante. Os modelos do Car1 a Car6 (que foram seleccionados para o estudo) referem-se a diferentes modelos com diferentes comprimentos, mas com comportamento de condução semelhante.
Categoria dos veículos	Categorias estáticas de veículos pré-definidas. Assume-se que os veículos pertencentes à mesma categoria exibem comportamentos similares.

Tabela 4.1 – Características dos tipos de veículos, classe de veículos e categoria dos veículos.

O tipo de veículo seleccionado para o estudo de caso é o automóvel (*Car*). Os parâmetros estáticos (categoria, modelo do veículo, comprimento, largura, ocupação e cor) e funções e distribuição (aceleração máxima, aceleração desejada, desaceleração máxima e desaceleração desejada) utilizados são os que estão definidos por defeito.

No que diz respeito à classe de veículos, considerou-se o automóvel (*Car*).

4.3.1.4 Comportamento de condução

No VISSIM, tanto o modelo do *Car following* como o modelo da mudança de pista usam uma extensa gama de parâmetros pré-definidos. Esses parâmetros afetam diretamente os resultados da simulação da interação entre os veículos, pelo que pequenas alterações podem produzir

resultados bastante diferentes. Nesse sentido, só usuários experientes devem modificar qualquer um dos parâmetros. Para o presente estudo utilizaram-se os valores padrão.

O comportamento de condução está ligado a cada *link* pelo tipo de comportamento. Por defeito, estão predefinidos cinco conjuntos de parâmetros de comportamento de condução:

- *Urban (motorized)* – tipo de comportamento selecionado devido às características da rede do estudo de caso;
- *Right-side rule (motorized)*;
- *Freeway (free lane selection)*
- *Footpath (no interaction)*;
- *Cycle track (free overtaking)*.

Comportamento de Car following

A avaliação do comportamento baseado no *Car following* é feita com base nos valores padrão do *software* (Figura 4.3). Esses parâmetros são os seguintes:

- *Look ahead distance* – define a distância de visão frontal do condutor, a fim de reagir aos outros veículos quer à frente quer ao lado (dentro do mesmo *Link*). Este parâmetro tem um valor máximo e mínimo e ainda o número de veículos;
- *Look back distance* – define a distância de visão à retaguarda do condutor, a fim de reagir aos veículos que se aproximam pela traseira (dentro do mesmo *Link*). Este parâmetro considera o valor máximo e mínimo;
- *Temporary lack of attention* (parâmetro do “sono”) – período de não reação dos condutores às ações do veículo que o precede. Este parâmetro tem em conta a duração (quanto tempo essa falta de atenção dura) e a probabilidade (probabilidade de ocorrência da falta de atenção);
- *Smooth close-up behavior*
- *Standstill distance for static obstacles*
- *Car following model* – seleciona o modelo básico para o comportamento do carro seguinte. Dependendo do modelo selecionado o *Model parameters* muda.

- *Wiedemann 74*: Modelo apropriado principalmente para o tráfego urbano e áreas *merging/weaving*. Este foi o modelo selecionado, pois o estudo de caso é em meio urbano;
 - *Wiedemann 99*: Modelo apropriado principalmente para o tráfego interurbano (autoestradas), exceto áreas *merging/weaving*;
 - *No interaction*: Veículos não reconhecem qualquer outro veículo (pode ser usado para um comportamento de pedestres simplificado).
- *Model parameters* – Dependendo do modelo de *Car following* selecionado o número de parâmetros disponíveis muda.

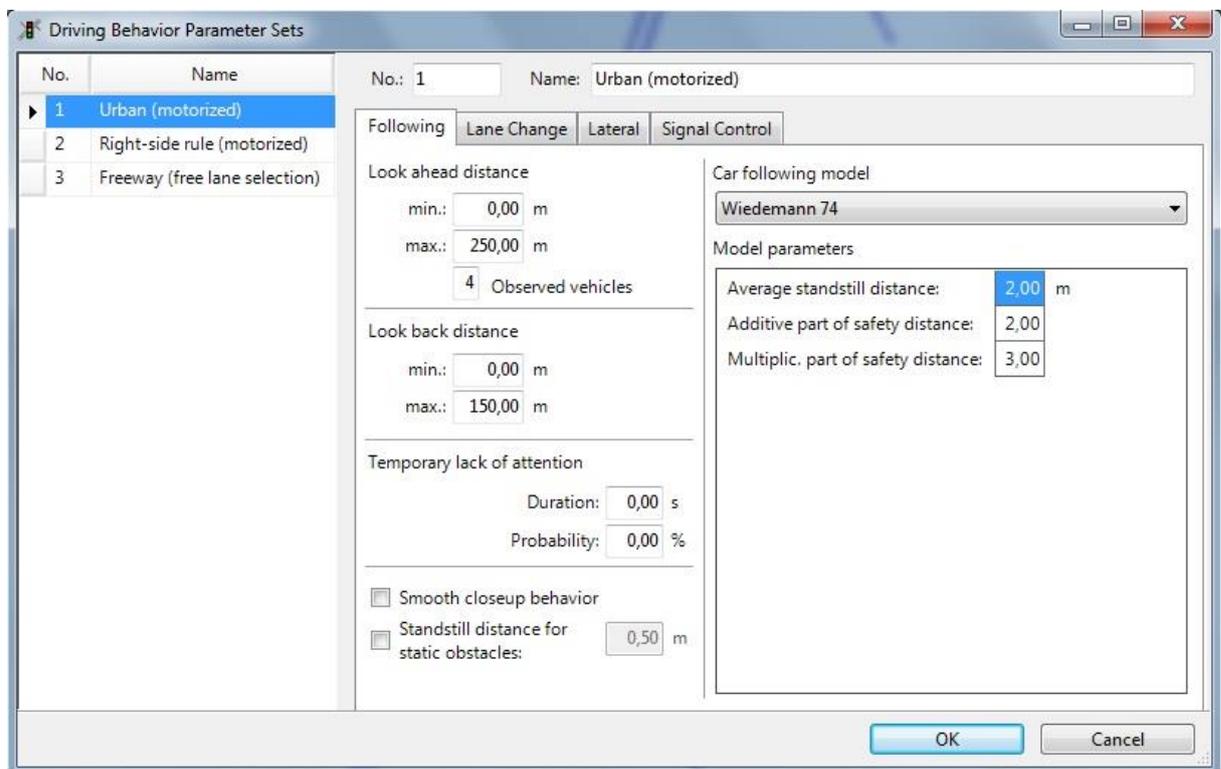


Figura 4.3 – Janela das características do comportamento do *Car following*.

Parâmetros do modelo Wiedemann 74

Os parâmetros disponíveis (consideram-se os valores padrão, já apresentados na figura 4.3) são:

- *Average standstill distance* (a_x) – define a distância média desejada entre dois carros parados.

- *Additive part of desired safety distance* (bx_add) e *Multiplic. part of safety distance* (bx_mult) – afetam o cálculo da distância de segurança.

A distância d entre dois veículos é calculada recorrendo à seguinte fórmula:

$$d = ax + bx \quad (4)$$

onde ax é a distância de paragem

$$bx = (bx_add + bx_mult * z) * \sqrt{v} \quad (5)$$

v é a velocidade do veículo [m/s]

z é um valor no intervalo [0,1], que é a distribuição normal em torno de 0,5, com um desvio padrão de 0,15

Mudança de pista

Existem basicamente dois tipos de mudança de pista no VISSIM:

- Por necessidade (a fim de atingir o próximo conector da rota);
- Por opção (para obter mais espaço/velocidade superior).

O parâmetro que define a forma de ultrapassar (*General Behavior*) dos veículos permite duas hipóteses de seleção:

- *Free lane selection* – os veículos são autorizados a ultrapassar em qualquer pista. Este foi o parâmetro optado;
- *Right side rule resp. left side rule* – Permite ultrapassagens na pista rápida somente se a velocidade da pista rápida for superior a 60 km/h (no caso em estudo, não há a existência de uma pista rápida).

Para os restantes parâmetros da mudança de pista existentes são considerados os valores padrão (Figura 4.4).

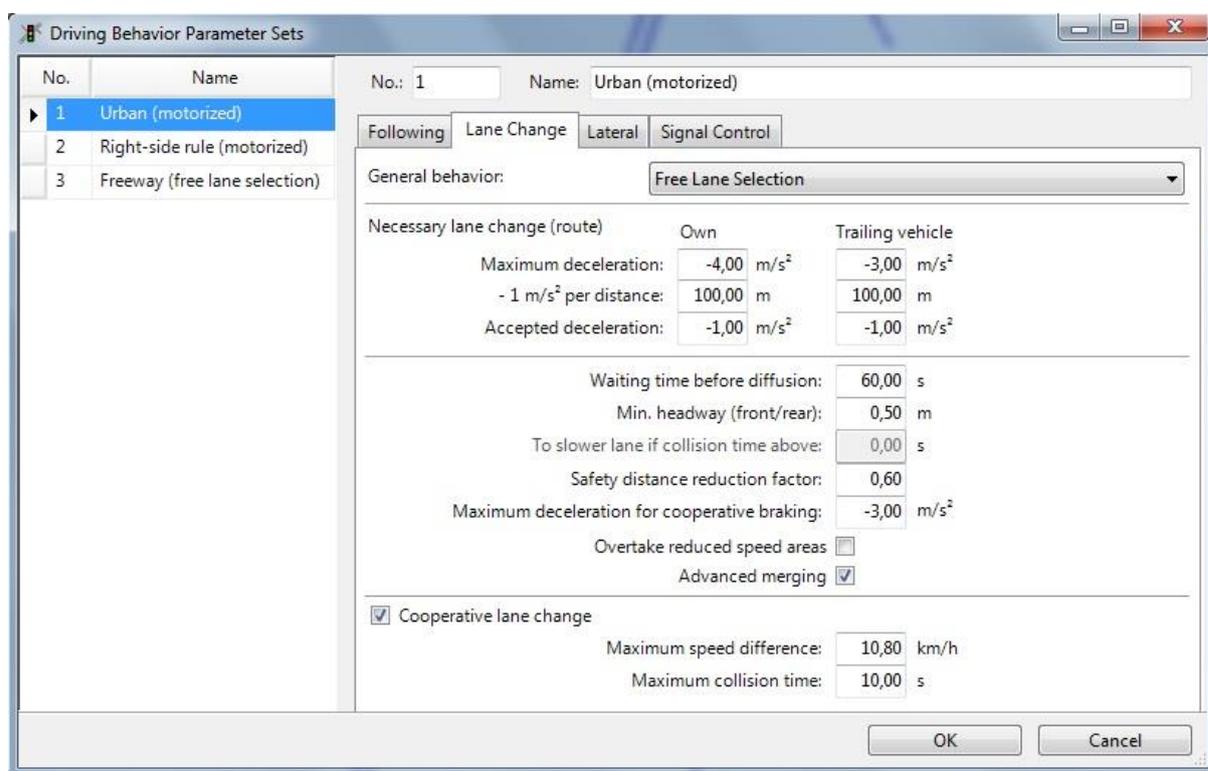


Figura 4.4 – Janela das características da mudança de pista.

Comportamento lateral

No VISSIM, por defeito, um veículo ocupa toda a largura de pista. Os parâmetros de comportamento lateral permitem aos veículos viajar em diferentes posições laterais. Assim as ultrapassagens dentro da mesma pista são permitidas caso estas sejam permitidas e caso a largura de pista seja suficiente.

Para o comportamento lateral assumi os valores padrão. A figura 4.5 apresenta esses valores.

O único parâmetro analisado é a posição desejada do veículo em fluxo livre (*Desired position at free flow*), que define a posição lateral desejada de um veículo dentro da pista enquanto se encontra em fluxo livre. As opções disponíveis são:

- *Middle of lane* (opção selecionada);
- *Any*;
- *Right*;
- *Left*.

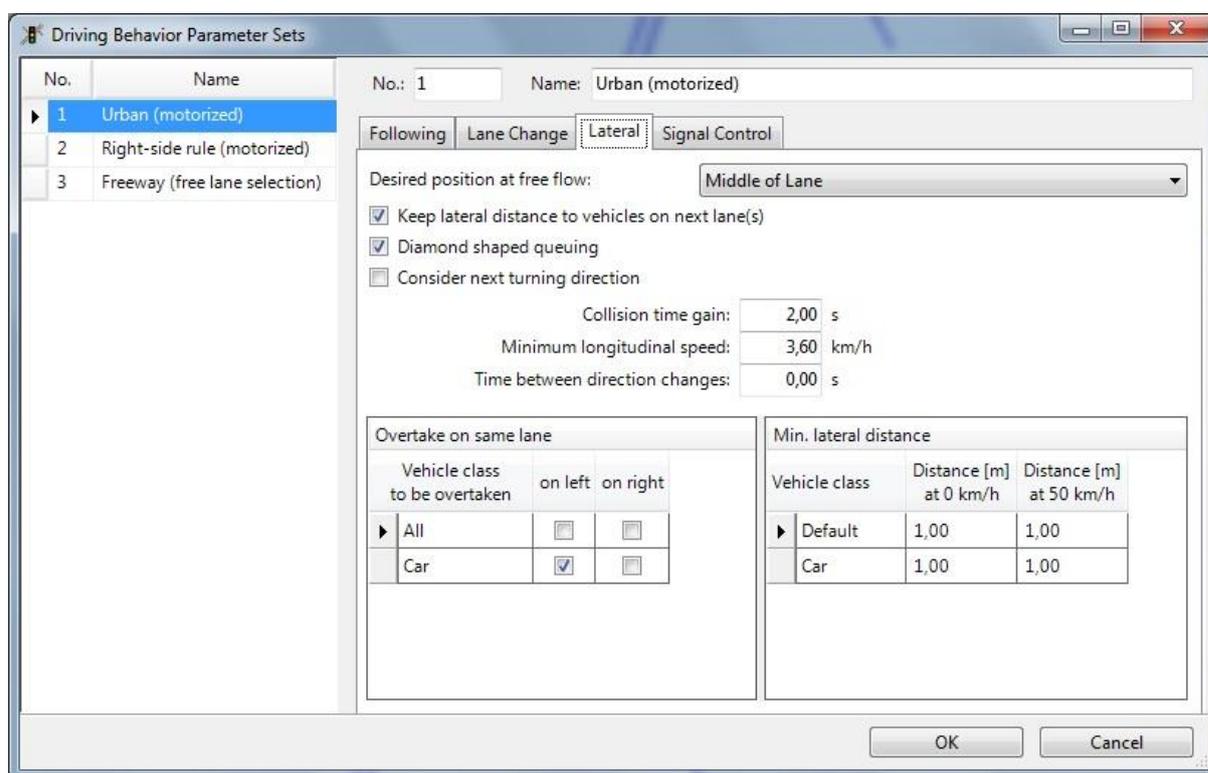


Figura 4.5 – Janela das características do comportamento lateral.

4.3.2 Modelação da rede de tráfego VISSIM PTV

O *link* é o elemento básico de uma rede de tráfego em VISSIM que representa um ou múltiplos segmentos da faixa rodoviária com a orientação específica do fluxo e um determinado número de vias. Uma rede pode ser construída conectando *links* através de conectores. Apenas *links* conectados permitem a continuidade do tráfego.

A rede VISSIM consiste em:

- Dados estáticos que permanecem inalterados durante a simulação e representam a infraestrutura da rede viária;
- Dados dinâmicos, contendo todas as informações sobre o tráfego simulado, como por exemplo: volume de tráfego, localização dos pontos de decisão de roteamento e rotas, regras de prioridade para modelar cruzamentos, etc.

4.3.2.1 Codificação da rede

O nível de detalhe requerido para replicar a infraestrutura rodoviária modelada depende da finalidade da aplicação do VISSIM. Recorrendo ao *software* VISSIM é possível modelar

virtualmente qualquer tipo de intersecção (ou sequência de intersecções da rede), com uma precisão de até um milímetro.

Com a intenção de simular operações de tráfego é necessário construir um modelo VISSIM exato. A construção dos modelos a partir do zero deve basear-se pelo menos num mapa à escala real da rede.

Os dados sobre a morfologia da área de estudo foram obtidos através do *software* de cartografia (*freeware*) *Google Earth* (Figura 4.6). A imagem assim obtida, foi inserida no VISSIM e redimensionada à escala real com precisão para evitar inconsistências.



Figura 4.6 – Vista aérea da Avenida Dom Afonso Henriques (linha verde) e suas ruas secundárias (linhas vermelhas) com orientação Norte-Sul.

Links

O primeiro passo para codificar a rede VISSIM passa por traçar *links* para a avenida principal, sabendo que estes não devem fazer curvas. Por esse motivo nos cruzamentos recorre-se aos conectores de forma a modelar movimentos giratórios. Cada *link* criado não pode ter diferentes secções com diferentes números de pistas. A largura da via é relevante apenas para gráficos e para determinar se um veículo pode passar outro veículo na mesma via ou na via adjacente (se os parâmetros de comportamento de condução assumidos permitirem). A largura da pista não influencia automaticamente a velocidade em fluxo livre do veículo.

A inclinação (*gradient*) da rede rodoviária afeta as capacidades de aceleração e desaceleração dos veículos nos *links*. Para todos os *links* é inserida a percentagem de inclinação real da rede rodoviária.

Conectores

A fim de criar uma rede rodoviária, os *links* necessitam ser conectados a outros *links*. Não é suficiente colocar um *link* no topo de outro *Link* para os veículos continuarem no *Link* seguinte. A continuidade entre *links* é assegurada através dos conectores.

Mudanças de velocidade desejada

Sempre que há uma mudança da velocidade de fluxo livre na rede VISSIM, a mudança de velocidade de distribuição tem de ser definida. Há duas formas de definir essas mudanças na distribuição de velocidade:

- Áreas de velocidade reduzida (mudança temporária);
- Decisões de velocidade desejada (mudança permanente).

Mudanças de velocidade são necessárias para modelar o seguinte:

- Curvaturas, curvas e pistas de viragem nos cruzamentos;
- Limites de qualquer velocidade;
- Afunilamentos.

As áreas de velocidade reduzida e as decisões de velocidade desejada são modeladas como elementos da rede VISSIM. A principal diferença entre os dois reside na forma e local onde é feita a alteração da velocidade. Nas áreas de velocidade reduzida a alteração de velocidade (redução à entrada e aceleração à saída) é feita nos *links* imediatamente antes e depois da área em questão. Ou seja, dentro da área de velocidade reduzida o veículo já circula à velocidade definida para a sua classe de veículo. Nos elementos de decisão de velocidade desejada as

alterações de velocidade fazem-se dentro do próprio elemento, isto é ao passar na secção transversal à decisão.

Áreas de velocidade reduzida

Áreas de velocidade reduzida são normalmente utilizadas para curvas. Assim, essas áreas são colocadas em conectores em vez de *links*. Uma área de velocidade reduzida só tem efeito para os veículos das classes de veículos selecionadas.

Decisões de velocidade desejada

A decisão de velocidade desejada define a posição em que os veículos pretendem mudar a velocidade desejada. Assim, a fase de aceleração ou desaceleração ocorre após o veículo ter passado o ponto de decisão. A decisão de velocidade desejada é colocada num local onde a mudança de velocidade permanente devia tornar-se eficaz. Para uma classe de veículos relevante (*Car*) um conjunto de dados é definido. Eles incluem a distribuição da velocidade desejada (50 km/h para a avenida principal e a Rua Dr. Henriques Seco e 20 km/h para as ruas secundárias) atribuída a essa classe de veículos à medida que atravessam a decisão de velocidade desejada.

Marcadores de pavimento

Os marcadores de pavimento (*pavement markers*) correspondem à colocação de sinais nas pistas alusivos aos movimentos de viragem ou direção permitidos. Estes marcadores de pavimento não afetam o comportamento de condução. Foram colocados marcadores onde existiam na realidade.

4.3.2.2 Tráfego Automóvel

O VISSIM incorpora basicamente dois métodos para o modelo de informação automóvel de roteamento:

- Rotas estáticas, que usam decisões de roteamento (ou decisões de direção): com rotas estáticas o caminho dos veículos que viajam pela rede VISSIM pode ser estaticamente determinado por decisões de roteamento ou decisões de direção. Este foi o método adotado já que não existe praticamente congestionamento e devido à dimensão reduzida da rede seria impossível encontrar rotas alternativas às definidas estaticamente.
- Atribuição dinâmica, que utiliza caminhos alternativos à medida que os caminhos originais mais curtos se vão congestionando.

Composição da frota de veículos

A composição da frota de veículos representa a percentagem de cada tipo de veículos que circula na rede e é definida antes da introdução do fluxo de entrada total. Desta forma cada tipo de veículo terá uma percentagem de fluxo relativa e uma distribuição de velocidades (Figura 4.7).

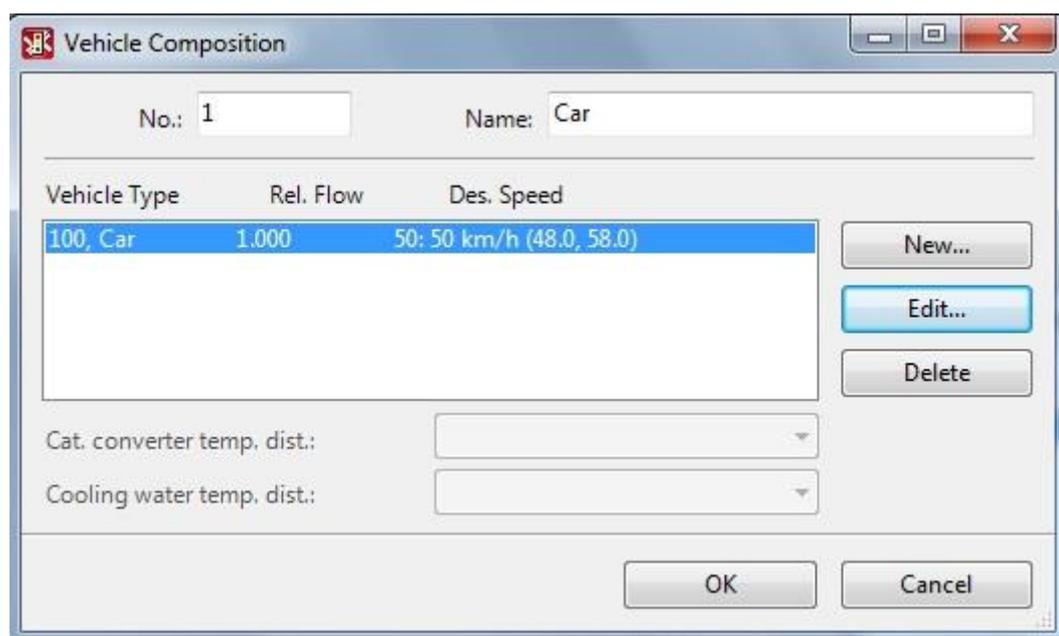


Figura 4.7 – Janela das características da composição de veículos.

Inputs de veículos (Volumes de tráfego)

Para a definição de *inputs* de veículos é definida uma composição de veículos (*Car*). Os volumes de tráfego são definidos para cada ponto de injeção de veículos e para cada intervalo de tempo, em veículos por hora (veic/h) (Figura 4.8). Para cada intervalo de tempo, os veículos que entram num determinado *link* seguem a distribuição de Poisson.

Os dados de *inputs* de veículos estão dispostos em duas secções:

- Secção de volumes/composição;
- Secção de intervalos de tempos.

Para cada *link*, os *inputs* de veículos estão dispostos em colunas, ordenados por intervalos de tempo. Para cada combinação de *links* e intervalos de tempo, um par de dados é composto por um volume (linha superior) e uma composição de veículos (linha inferior). O valor dos volumes é considerado exato, pois gera exatamente o número de veículos editados a entrar na

rede em oposição a uma distribuição. Desta forma as células aparecem com cor de fundo a amarelo.

O limite de intervalo de tempo é definido para 4200 segundos de simulação, ou seja, 10 minutos (600 segundos) mais 1 hora (3600 segundos) que corresponde ao PPM. Acrescentam-se esses 10 minutos para que no início de teste de simulação já haja veículos a circular na rede de uma forma regular (*warm up period*).

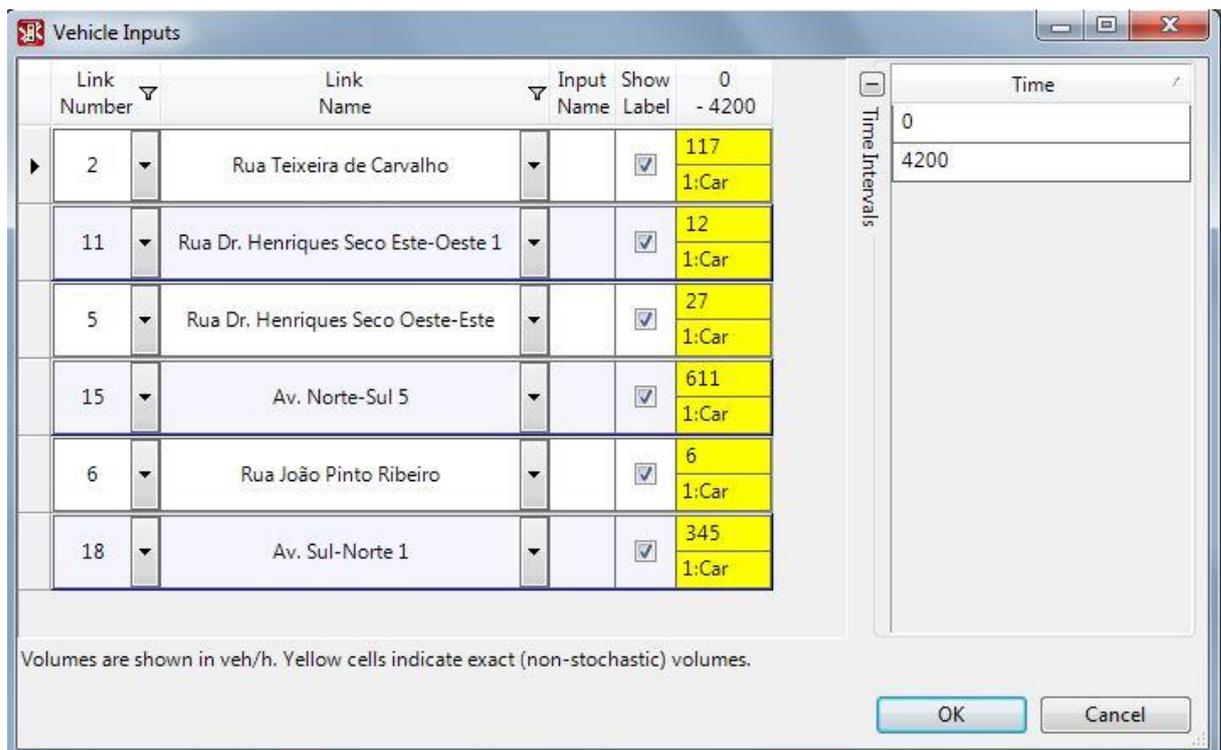


Figura 4.8 – Janela das características da entrada de veículos.

Decisões de roteamento e rotas

Rota define-se como uma sequência fixa de *links* e conectores, e resulta de uma decisão de roteamento. Os veículos ao passarem pela seção transversal inicial têm pelo menos de passar por uma seção de destino transversal.

A decisão de roteamento afeta apenas veículos da classe que está contida na decisão de roteamento. A decisão de roteamento estático define a rota de veículos a partir do ponto inicial (vermelho) para qualquer um dos destinos definidos (verde), utilizando uma percentagem estática para cada destino. É este tipo de decisão que é adotada.

Relativamente às rotas é ainda necessário definir os seguintes parâmetros (Figura 4.9):

- Os intervalos de tempo do tipo de decisão de roteamento;

- Selecionar a(s) classe(s) de veículo(s) apropriada(s) por decisão de roteamento.

A lista de rotas contém, em particular:

- Todas as rotas selecionadas via decisões de roteamento;
- Todos os intervalos de tempo definidos para este tipo de decisões de roteamento (colunas);
- O valor correspondente de fluxo relativo (em percentagem) por rota e intervalo de tempo.

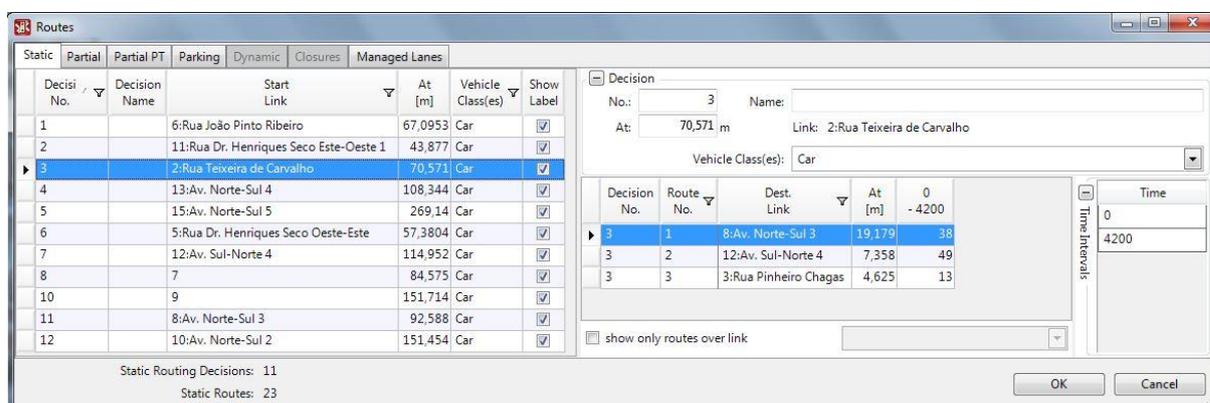


Figura 4.9 – Janela das características das decisões de roteamento.

O *software* VISSIM usa fluxos relativos de veículos (em vez de fluxos absolutos) para determinar as proporções entre todas as rotas e destinos de uma decisão de roteamento. Esta característica permite que tanto os volumes de fluxo reais ou percentuais possam ser inseridos. Internamente, o VISSIM soma todos esses fluxos relativos e calcula a percentagem absoluta para cada fluxo automaticamente.

4.3.2.3 Intersecções não sinalizadas

No VISSIM as intersecções não sinalizadas, bem como os *links* de separação ou junção são modeladas usando técnicas de modelação apropriadas.

Regras de prioridade

A prioridade de passagem para os movimentos conflituantes não semaforizados rege-se pelas regras de prioridade do código de estrada. Desta forma, foi aplicada a todas as situações em que os veículos em diferentes *links*/conectores deveriam reconhecer o outro veículo.

A regra de prioridade consiste em:

- Uma linha de paragem (*stop line*);
- Um ou mais marcadores de conflito(s) (*conflict marker*) que estão associados a uma linha de paragem.

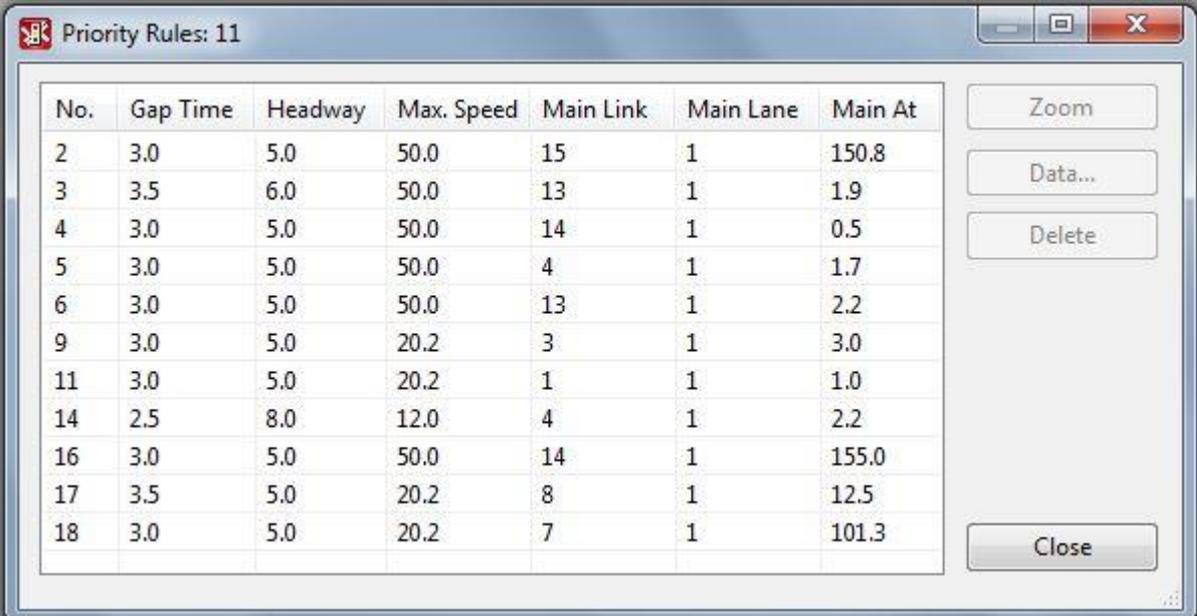
Relativamente aos marcadores de conflito(s) é necessário verificar duas condições principais:

- Distância mínima (*minimum headway*) [m];
- Tempo de abertura mínimo (*minimum gap time*) [s].

A distância mínima é tipicamente definida como o comprimento da área de conflito (*conflict area*).

O tempo de abertura, durante a simulação, é determinado a cada intervalo pelo tempo que o veículo que flui para a zona de conflito demora a chegar ao marcador de conflito, assumindo que continua a deslocar-se à velocidade anterior.

A figura 4.10 apresenta os valores adotados (*minimum gap time*, *minimum headway* e *maximum speed*) para os *links*/conectores em que houve necessidade de aplicar regras de prioridade para regular o tráfego de veículos sem ocorrência de incidentes.



No.	Gap Time	Headway	Max. Speed	Main Link	Main Lane	Main At
2	3.0	5.0	50.0	15	1	150.8
3	3.5	6.0	50.0	13	1	1.9
4	3.0	5.0	50.0	14	1	0.5
5	3.0	5.0	50.0	4	1	1.7
6	3.0	5.0	50.0	13	1	2.2
9	3.0	5.0	20.2	3	1	3.0
11	3.0	5.0	20.2	1	1	1.0
14	2.5	8.0	12.0	4	1	2.2
16	3.0	5.0	50.0	14	1	155.0
17	3.5	5.0	20.2	8	1	12.5
18	3.0	5.0	20.2	7	1	101.3

Figura 4.10 – Janela das características das Regras de Prioridade.

Áreas de conflito

As áreas de conflito são elementos da rede que ajudam a governar os conflitos entre veículos em dois *links* ou conectores diferentes. Trata-se de uma alternativa às regras de prioridade para a definição de prioridade em intersecções. Uma área de conflito pode ser usada para modelar os seguintes tipos de conflitos:

- Conflitos Crossing – um *link* atravessa outro *link*;
- Conflitos Merging – dois conectores são conduzidos para o mesmo *link* ou um conector é conduzido a um *link* que já contém tráfego proveniente de upstream;
- Conflitos Branching – dois conectores vêm do mesmo *link* ou um conector vem de um *Link* que continua a jusante.

Para cada área de conflito selecionam-se quais os *links*/conectores conflitantes que têm direito de passagem (se houver). As áreas de conflito ativas são exibidas na linha de *status* e através das cores dos *links*:

- Ambos a amarelo – área de conflito passiva;
- Verde – o *link* é considerado estrada principal, logo com direito de passagem;
- Vermelho – o *link* é considerado estrada secundária, tendo por isso que ceder passagem aos veículos que se apresentarem na estrada principal (*link* a verde);
- Ambos a vermelho – é usado em conflitos *branching* onde não há prioridade dominante. Os veículos necessitam de ser ver mutuamente e seguem segundo a ordem de chegada.

Os atributos afetam o cálculo do plano (perfil de aceleração) para cada veículo que se aproxima da área de conflito. Os seguintes atributos são relevantes apenas para algumas situações de conflito:

- *Visibility* – Distância máxima para a qual um veículo ao aproximar-se de uma área de conflito consegue ver os veículos no outro *link*. Foi tido em atenção particularmente as estradas secundárias nas quais há uma redução de visibilidade devido aos edifícios circundantes. Para esses casos foi necessário determinar a distância (em metros) dos edifícios em relação à estrada principal. Para os restantes assumiu-se que a distância máxima seria de 100 metros;

- *Front Gap* (para conflitos *crossing* e *merging*) – Intervalo mínimo, em segundos, entre a extremidade traseira de um veículo na estrada principal e a extremidade dianteira de um veículo na estrada secundária;
- *Rear Gap* (só para conflitos *crossing*) – Intervalo mínimo, em segundos, entre a extremidade traseira de um veículo na estrada secundária e a extremidade dianteira de um veículo na estrada principal;
- *Safety distance factor* (só para conflitos *merging*) – Este valor é multiplicado pela distância de segurança normal desejada do veículo na estrada principal, para determinar o avanço mínimo que um veículo na estrada secundária deve fornecer no momento em que ele está completamente dentro da área de conflito *merging*;
- *Additional stop distance* (só para estradas secundárias) – Distância que desloca a linha de paragem (imaginária) para fora da área de conflito.
- *Observe adjacent lanes* – Se a opção estiver ativa, os veículos que chegam à intersecção pela estrada não prioritária, vão prestar atenção aos veículos que circulam na estrada prioritária e que se preparam para mudar para a via conflituante. Trata-se de uma opção para medir o grau de civismo e a prática de condução defensiva dos condutores;
- *Anticipate routes* – Para este parâmetro houve a necessidade de inserir um número real pertencente ao intervalo [0,1]. Este factor descreve a percentagem de veículos da estrada não prioritária (secundária) que ao chegarem à intersecção com a estrada prioritária (principal) consideram as rotas que os veículos que se deslocam na estrada principal (prioritária) podem adotar de forma a não entrarem na área de conflito;
- *Avoid blocking* (só para conflitos *crossing*) – considera o valor pertencente ao intervalo [0,1] que descreve a percentagem de veículos da estrada principal que não entrarão na área de conflito caso tenham que esperar ficando lá parados. Desta forma os veículos da estrada secundária podem atravessar a zona de conflito (dado que os condutores da via principal estão parados atrás da área de conflito até terem condições para avançar).

Para os atributos mencionados anteriormente (*Front Gap*, *Rear Gap* e factor de distância de segurança) e relativamente à classe de veículos em estudo (*car*) assumem-se valores padrão dados pelo *software* VISSIM. Na figura 4.11 são apresentados todos os valores dos atributos para cada área de conflito selecionada.

Link 1	Visibility Link 1 [m]	Link 2	Visibility Link 2 [m]	Front Gap [s]	Rear Gap [s]	Safety Dist. Factor	Additional Stop Distance [m]	Observe adjacent lanes	Anticipate Routes	Avoid Blocking
7	100	10004	3	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
7	100	10008	3	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
12: Av. Sul-Norte 4	100	10025	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
14: Av. Sul-Norte 6	100	10014	4	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
15: Av. Norte-Sul 5	100	10015	4	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
16: Av. Sul-Norte 5	100	10012: Av. Norte-Sul 4-5	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
16: Av. Sul-Norte 5	100	10024	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10000	100	10023	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10003	100	10009	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10005	20	10006	50	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10007	6	10012: Av. Norte-Sul 4-5	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10011	100	10017	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10012: Av. Norte-Sul 4-5	100	10017	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10012: Av. Norte-Sul 4-5	100	10024	4	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10013	4	10018	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1
10020	100	10025	100	0.5;10:0.5	0.5;10:0.5	1.5;10:1.5	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1

show all possible Conflict Areas in Node:

Number of Conflict Areas: 16

OK Cancel

Figura 4.11 – Janela com as características das áreas de conflito.

A exibição da rede é feita de duas formas: *Normal display*, onde a rodovia é visualizada a cinza escuro e *Center line display* em que através desta exibição a mesma rodovia é apresentada com linhas centrais dos *links* (azul) e conectores (roxos) (como se poderá ver na Figura 5.1). Estas duas formas de visualização estão disponíveis tanto em 2D como em 3D.

4.4 Utilização do módulo EnViver

O cálculo das emissões de um fluxo de tráfego da rede implica o conhecimento dos fluxos pelo que, o primeiro passo é importar os dados de tráfego resultantes de uma simulação. Esses dados são exportados do VISSIM num ficheiro de texto com a terminação *.fzp.

Os dados do VISSIM necessários para o cálculo de emissões através do módulo EnViver são os seguintes:

- *VehNr* – Número de veículos;
- *Type* – Tipo de número de veículos;
- *VehTypeName* – Nome do tipo de veículos;
- *t* – Tempo de simulação [s];
- *vMS* – Velocidade no final da etapa de simulação [m/s];

- *WorldX* – Coordenadas x [m] (final da dianteira do veículo, no fim da simulação);
- *WorldY* – Coordenadas y [m] (final da dianteira do veículo, no fim da simulação);
- *Gradient* – inclinação da rodovia do *Link* específico;
- *Link Number* – Segmento da rodovia ID;
- *Power* – Potência disponível;
- *Weight* – Peso do veículo.

Uma vez que o conjunto de dados a partir do VISSIM já foi importado no modelo EnViVer, os tipos de veículos definidos no VISSIM são ligados às classes de emissão dos veículos no EnViVer. Devido à importância do mapeamento apropriado para os resultados calculados, a janela das atribuições da classe do veículo (Figura 4.12) é mostrada automaticamente logo após importar o arquivo de fluxo de tráfego. De acordo com a informação dada pela empresa TNO, sendo o objetivo a simulação de automóveis de passageiros, deve-se selecionar a classe de emissão de veículos *Light_Duty_City_2010* para o ano (*Era*) de 2010, por se tratar de uma combinação de veículos de passageiros e vans, em que todos os veículos têm menos de 3500 kg de peso bruto. Notar que esta versão do Enviver não permite a personalização da frota, sendo que está a ser terminada uma nova versão que o permitirá, no entanto a mesma não estava disponível para a conclusão desta tese.

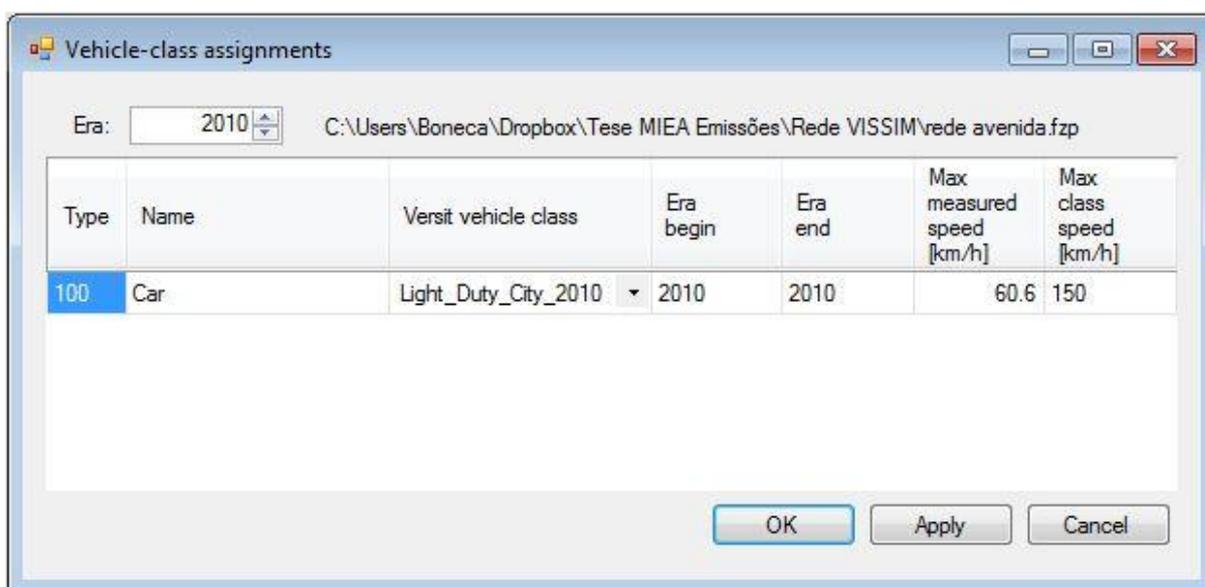


Figura 4.12 – Janela com as características das atribuições da classe de veículos selecionada.

Uma vez que já está selecionada a classe de veículo no módulo EnViVer procede-se ao cálculo das emissões do tráfego. Para isso seleciona-se o botão referente ao cálculo dessas emissões (Figura 4.13).

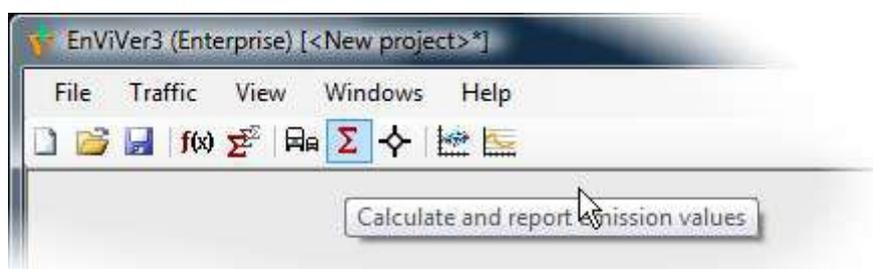


Figura 4.13 – Botão do cálculo das emissões do tráfego selecionado.

4.5 Cálculo de emissões no modelo macro - HBEFA

A análise com recurso à macro simulação é feita recorrendo ao *software* VISUM de acordo com a metodologia adotada em Ferreira (2012).

Os resultados da dissertação Ferreira (2012) foram obtidos recorrendo a dados de 2008. A fim de obter dados mais realistas e atuais usa-se o mesmo fluxo de tráfego quer para a micro quer para a macro simulação alterando os volumes no VISUM e calculando novamente as emissões segundo esses volumes. Era impossível forçar o macromodelo a reproduzir com grande detalhe as contagens obtidas no terreno.

A estimação de emissões automóveis usando a macro simulação para os fluxos de tráfego atuais também é obtida de acordo com a metodologia adotada em Ferreira (2012). Foi necessário alterar também a frota automóvel em relação à metodologia usada na tese de mestrado referida, já que nesse trabalho a frota foi trabalhada para reproduzir o mais fielmente possível as frotas portuguesas. Neste caso sabemos que a frota definida no módulo EnViver é uma frota Holandesa de 2010. Não tendo disponível a frota Holandesa no HBEFA utilizou-se a Alemã que já vem pré-definida, assume-se assim que não serão muito diferentes.

A frota de veículos inserida no VISUM segundo a percentagem de cada tipo de veículo está representada na figura 4.14.

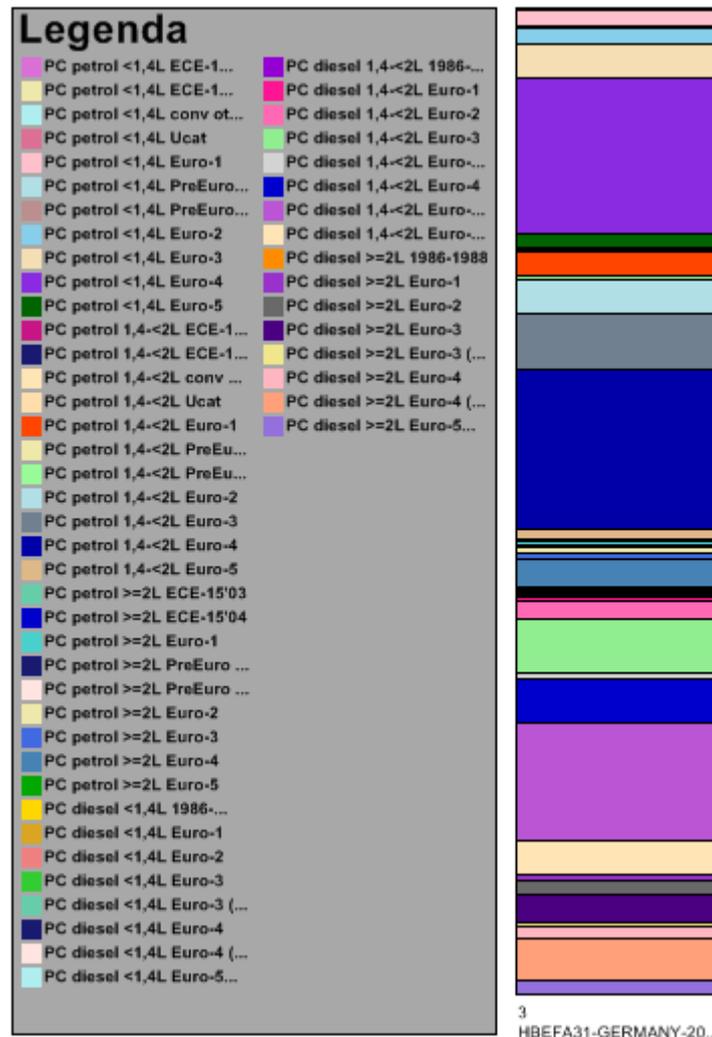


Figura 4.14 – Frota de veículos inserida no VISUM

Não querendo entrar em detalhes na metodologia de estimação a nível macro já que não é o principal objetivo desta tese. É necessário explicar que o HBEFA tem em consideração principalmente as velocidades em vazio no arco, a inclinação do arco e a razão entre volume e capacidade do arco. Este último indicador é o mais difícil de definir, já que a capacidade depende de muitos factores. Especialmente em meio urbano esta é influenciada por todas as intersecções a jusante do arco e não tanto pela capacidade *per se* do próprio *link*, o HBEFA ignora por completo estas intersecções no cálculo das emissões.

5. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos da aplicação dos modelos à Avenida Dom Afonso Henriques. É apresentada em primeiro lugar a rede de tráfego para o caso de estudo recorrendo ao *software* de micro simulação. Posteriormente, apresentam-se os resultados das emissões para os principais poluentes: CO₂, NO_x e PM₁₀, para o estudo de caso, tanto para o módulo EnViVer como para o módulo HBEFA. Na subsecção do módulo EnViVer são apresentados os mapas com a distribuição geográfica desses poluentes. O capítulo termina com a comparação dos resultados obtidos pelos módulos do cálculo de emissões de automóveis.

5.1 Software VISSIM

Nesta subsecção é apresentada a rede de tráfego do estudo de caso. A figura 5.1 mostra os dois tipos de exibição 2D da rede: *Normal Display* (imagem da esquerda) e *Center Line Display* (imagem da direita). A figura 5.2 mostra a rede em 3D.



Figura 5.1 – Exibição da rede rodoviária (2D).



Figura 5.2 – Exibição da rede rodoviária (3D).

5.2 Módulo EnViVer

Após a importação dos dados de fluxo de tráfego do VISSIM para o módulo EnViVer, o mapeamento das classes de veículos é gerado automaticamente, produzindo os mapas ilustrados na figura 5.3. Nesta figura o que podemos observar são as rotas de todos os veículos desenhadas com o rigor de um ponto da sua localização por cada décima de segundo.

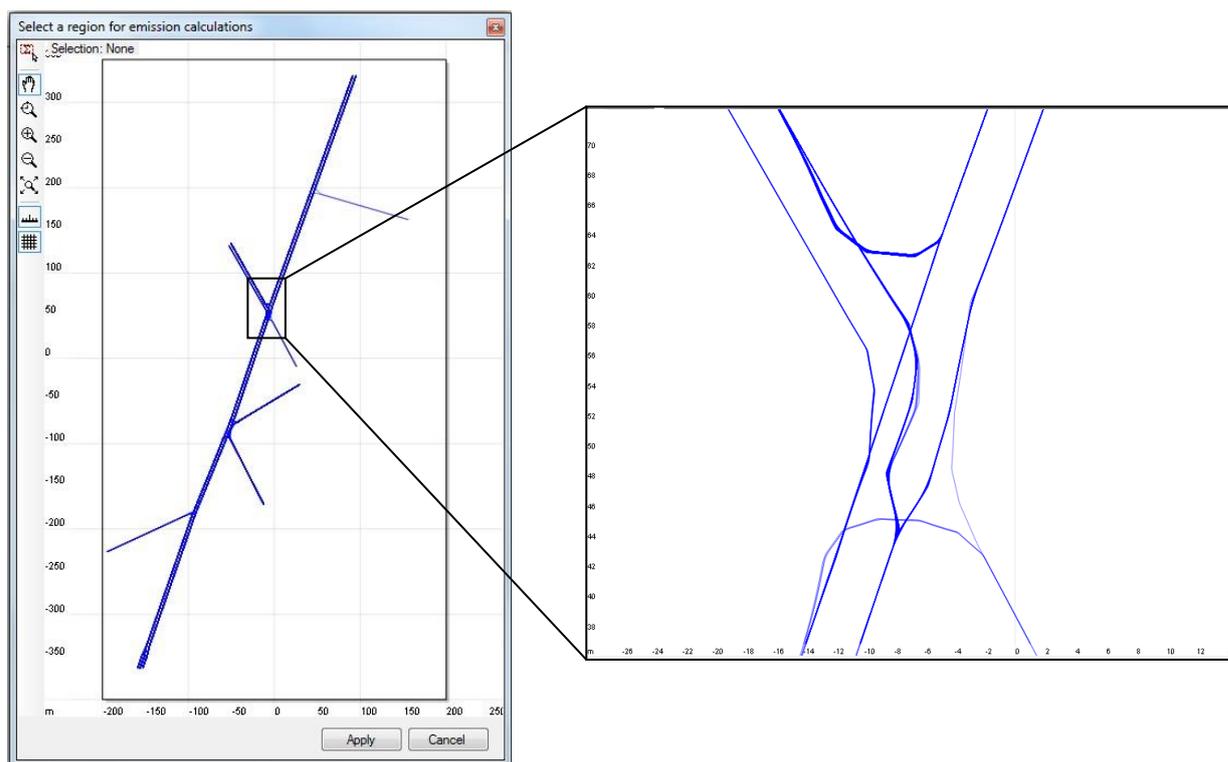


Figura 5.3 – Mapeamento da classe de veículos.

Uma vez concluído o cálculo das emissões de tráfego temos acesso à janela das emissões acumuladas por tipo de emissão (Figura 5.4). A simulação foi realizada 10 vezes por forma a obter uma média e desvio padrão para o valor das emissões acumuladas por tipo de poluente (Tabela 5.1). Nas 10 simulações obtiveram-se sempre valores diferentes das emissões por tipo de poluente.

CO2	NOx	PM10
1.337e+05 g	293.2 g	29.43 g
1.337e+05 g/h	293.2 g/h	29.43 g/h
234.3 g/km	0.5138 g/km	0.05156 g/km

Figura 5.4 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente para a 1ª medição.

De acordo com a Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que define as normas de desempenho em matéria de emissões dos automóveis novos de passageiros os valores de CO₂ para veículos de passageiros têm um limite de 120 g/km (Commission of the European Communities, 2007). Estas normas fazem parte da abordagem integrada da Comunidade com vista à redução das emissões de CO₂ dos veículos comerciais ligeiros até 2012. Uma vez que a frota automóvel utilizada foi a de 2010 era de esperar que os valores de CO₂ em g/km fossem superiores a 120. Verifica-se que o valor é significativamente superior (234,3 g CO₂/veí×km). No entanto essa diferença não é preocupante porque esse valor de referência é para um veículo em condições de circulação constantes (sem congestionamento), sem inclinações, e sem intersecções. Ou seja não se está a considerar o meio urbano que aumenta as emissões.

	CO ₂	NO _x	PM ₁₀
Média	132290 g	289,48 g	29,11 g
	232,69 g/veí×km	0,5093 g/veí×km	0,0512 g/veí×km
Desvio Padrão	± 1757,18 g	± 3,81 g	± 0,39 g
	1,8448 g/veí×km	0,0041 g/veí×km	0,0004 g/veí×km

Quadro 5.1 – Média e desvio padrão dos valores das emissões acumuladas por tipo de poluente, ao fim de 10 medições.

Para as condições do estudo de caso no período de ponta da manhã, não havendo semáforos ou outros elementos mais complexos de gestão de fluxos (rotundas, etc.), a variação dos valores é reduzida, pelo que os valores são significativos e representam a situação de tráfego em causa. Os valores obtidos para os desvios padrão são diminutos pelo que os resultados médios confirmam uma tendência bem definida.

O módulo EnViVer, para além das emissões totais emitidos numa determinada rede, calcula as emissões na rede por cada veículo por segundo. Na figura 5.6 é possível visualizar as características dos dados do fluxo de tráfego para a contagem de amostra (*Sample count*). A Figura exhibe o número de amostras de dados por célula na grelha e fornece uma indicação do nível de ocupação da rede por quadrícula.

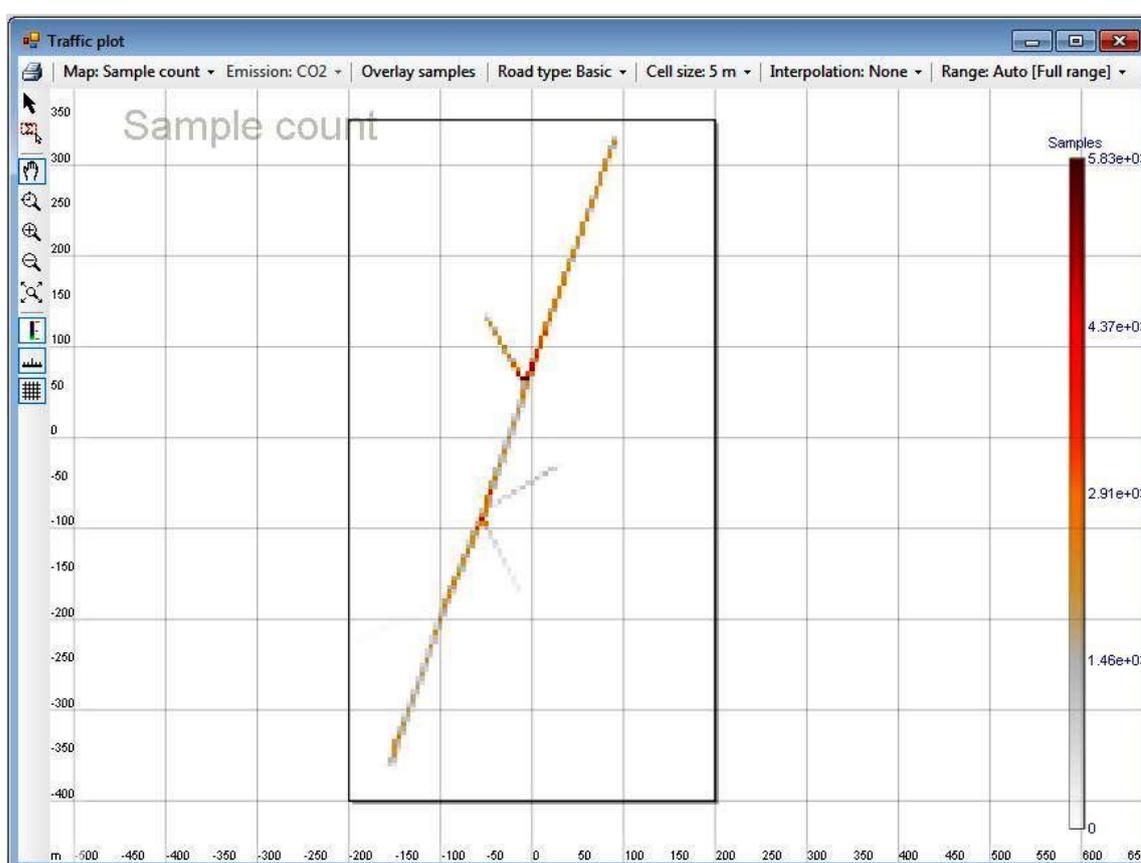


Figura 5.5 – *Sample count* por cada célula da grelha.

Relativamente às emissões de CO₂, os resultados obtidos podem ser visualizados de diferentes formas. Irão ser apresentados os mapas das emissões totais [g] (Figura 5.7), das emissões por km [g/km] (Figura 5.8) e da concentração de poluente no ar [µg/m³] (Figura 5.9).

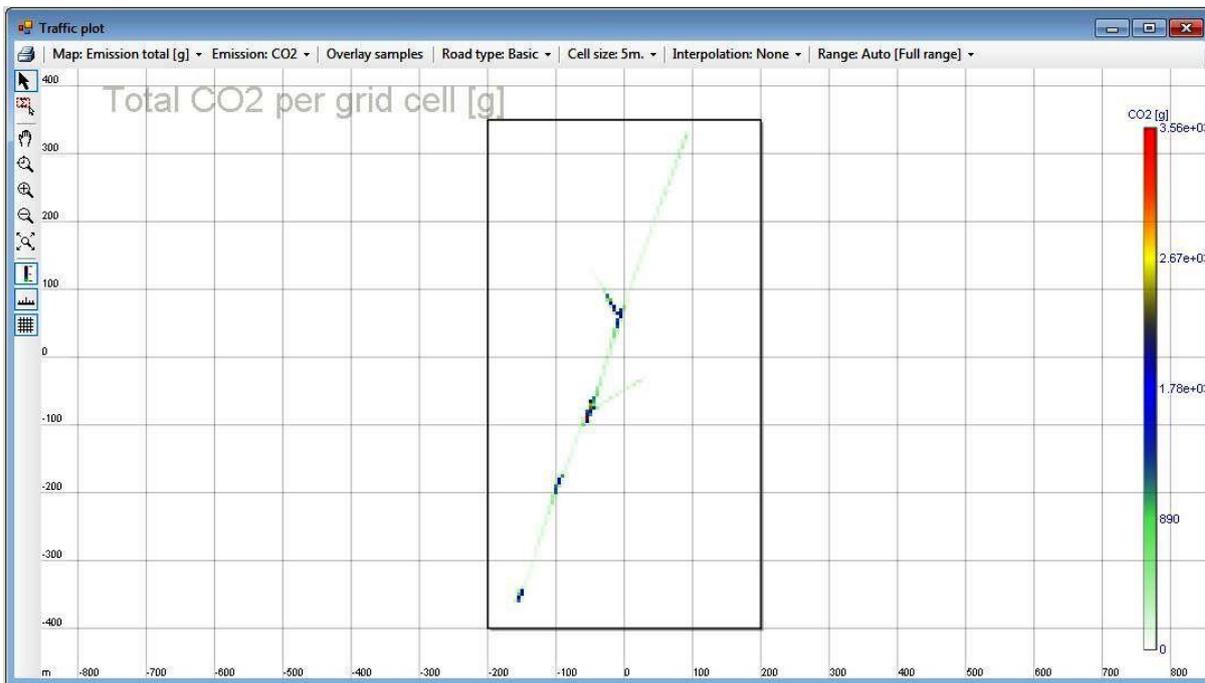


Figura 5.6 – Emissões totais de CO₂ por célula da grelha[g].

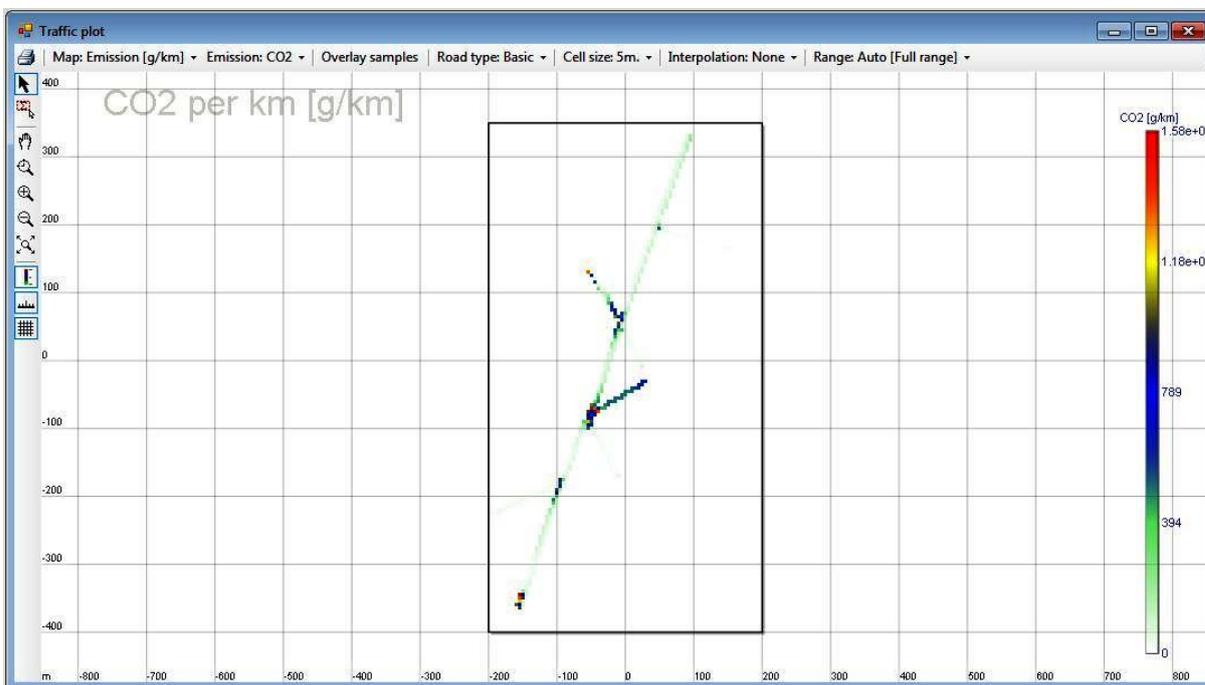


Figura 5.7 – Emissões de CO₂ por km [g/km].

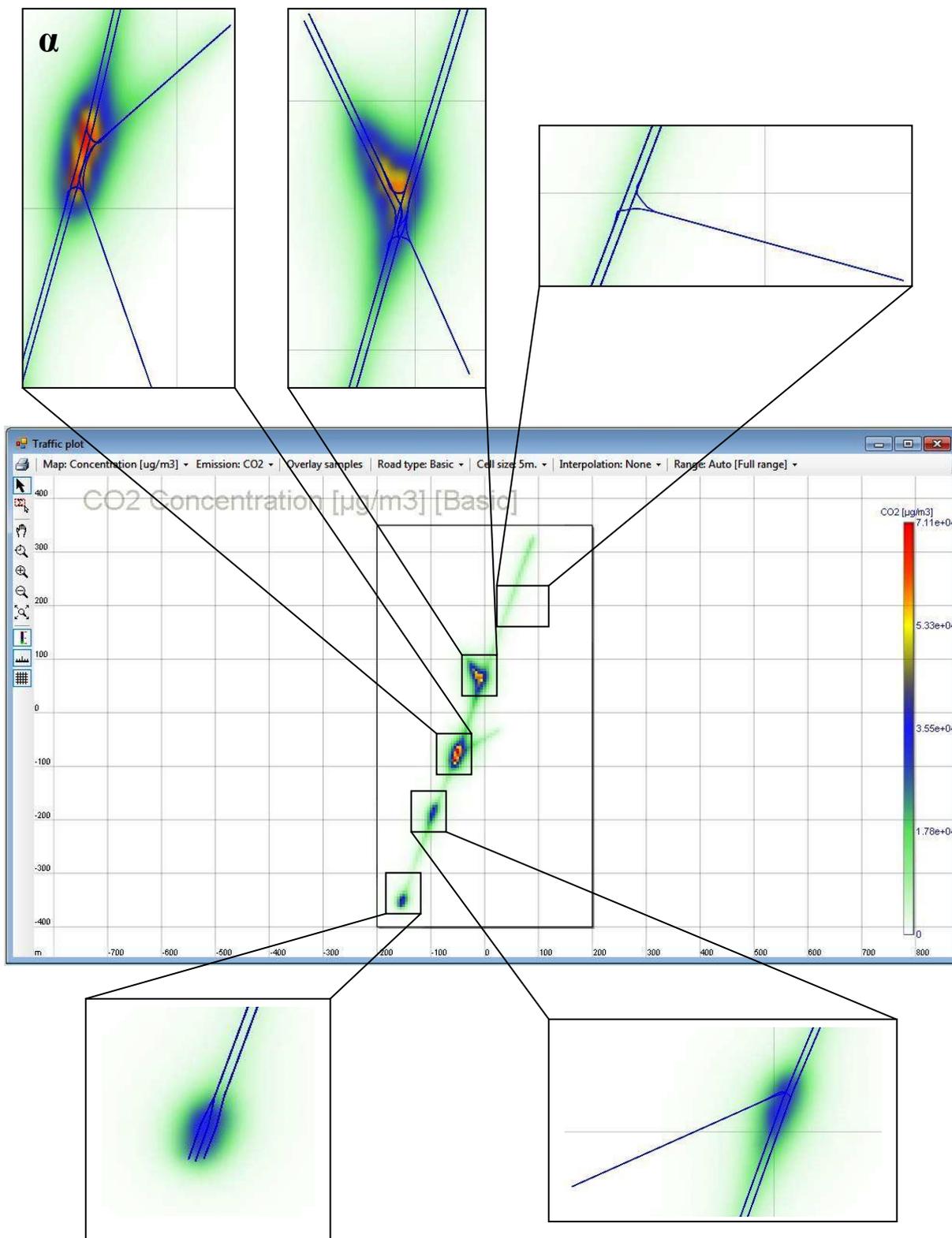


Figura 5.8 – Concentração de emissões de CO₂ [µg/m³] da rede em geral e respectivos cruzamentos.

O poluente CO₂ é um dos gases de efeito de estufa que menos contribui para o aquecimento global (uma vez que representa apenas 0,03% da atmosfera), mas, em contrapartida, é um dos principais gases causadores do efeito de estufa (WIKIPEDIA, 2013). É importante realçar que os automóveis de passageiros representam cerca de 12% do total de emissões deste poluente. Trata-se, portanto, de um poluente global que contribui para a elevação do nível do mar, recuo dos glaciares, degradação da ozonfera, ainda que não afete diretamente a saúde humana.

Através dos mapas da emissão de CO₂ verifica-se que a maior concentração do poluente ocorre:

- nos cruzamentos – zona onde por vezes os veículos são obrigados a esperar para depois arrancarem;
- nas zonas de velocidade reduzida – pois há um maior esforço do veículo para reduzir a sua velocidade;
- nas inclinações positivas (subidas) – onde há um esforço acrescido do motor e maior queima de combustível.

O cruzamento mais a Norte apresenta valores muito baixos, provavelmente devido ao número reduzido de veículos que descem essa rua (6 veículos).

Nas ruas com inclinação negativa (descidas) a emissão de CO₂ é quase nula, pelo que não são visíveis nos mapas.

Relativamente ao NO_x irão ser apresentados os mapas das emissões por emissões totais [g] (Figura 5.10), emissões por km [g/km] (Figura 5.11) e por concentração de poluente [µg/m³] (Figura 5.12).



Figura 5.9 – Emissões totais de NO_x por célula da grade [g].



Figura 5.10 – Emissões de NO_x por km [g/km].

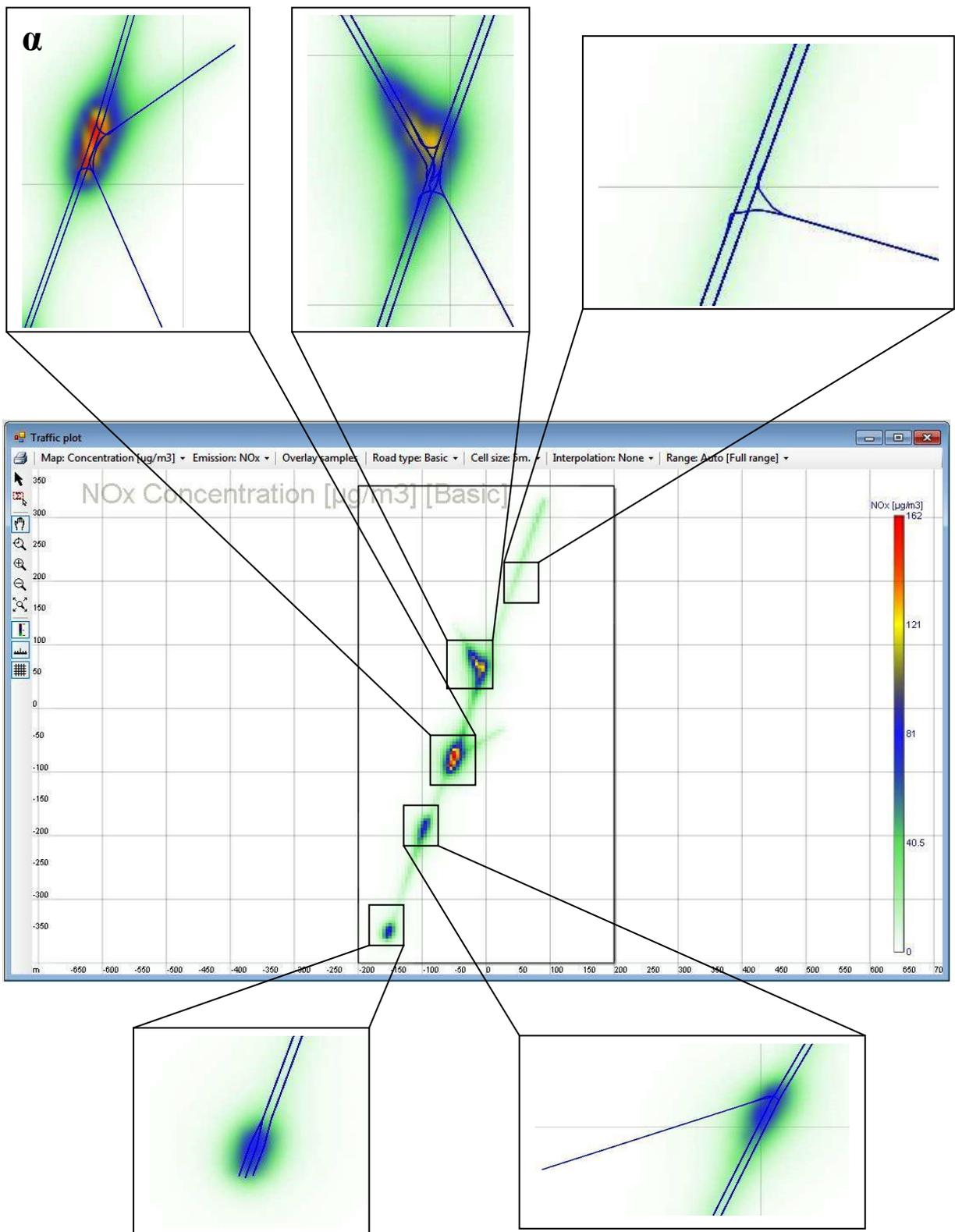


Figura 5.11 – Concentração de emissões de NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] da rede em geral e respectivos cruzamentos.

Os NO_x , em especial o dióxido de azoto (NO_2), são emitidos a partir da combustão a altas temperaturas e do sector rodoviário. O NO_x em contacto com COV's forma reações químicas que originam ozono troposférico (O_3). O ozono provoca vários problemas à saúde, nomeadamente dores torácicas, tosse e irritação da garganta. Desta forma, os NO_x são considerados poluentes locais que têm implicações graves na saúde humana.

Observando os mapas das emissões para o NO_x verifica-se que seguem a mesma tendência dos mapas das emissões de CO_2 , ou seja, ocorre maior libertação de NO_x nos cruzamentos, nas zonas de velocidade reduzida e nas subidas. Tal como para o CO_2 o cruzamento mais a Norte não apresenta emissões significativas deste poluente. O mesmo se verifica para as ruas com inclinação negativa (descidas), onde as emissões de NO_x são quase nulas.

No que diz respeito às emissões de PM_{10} são apresentados mapas de emissões por emissões totais [g] (Figura 5.13), emissões [g/km] (Figura 5.14) e por concentração de poluente [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (Figura 5.15).

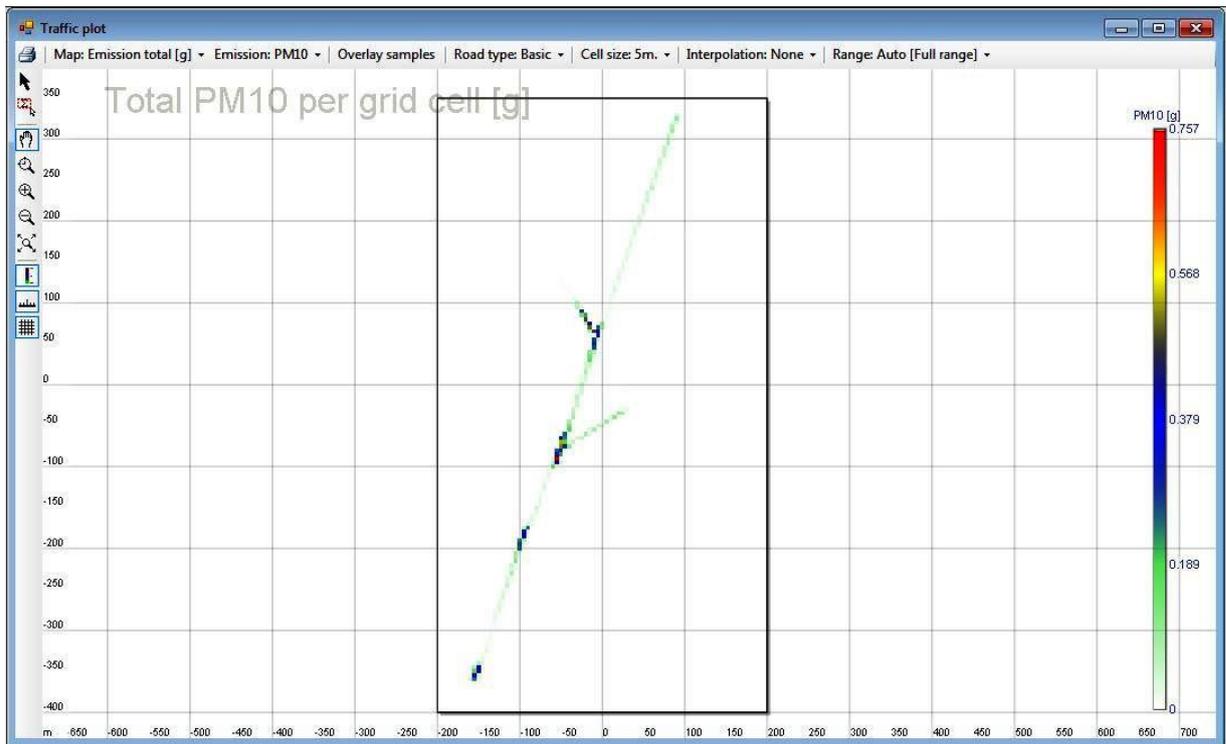


Figura 5.12 – Emissões totais de PM₁₀ por célula da grelha [g].



Figura 5.13 – Emissões de PM₁₀ por km [g/km].

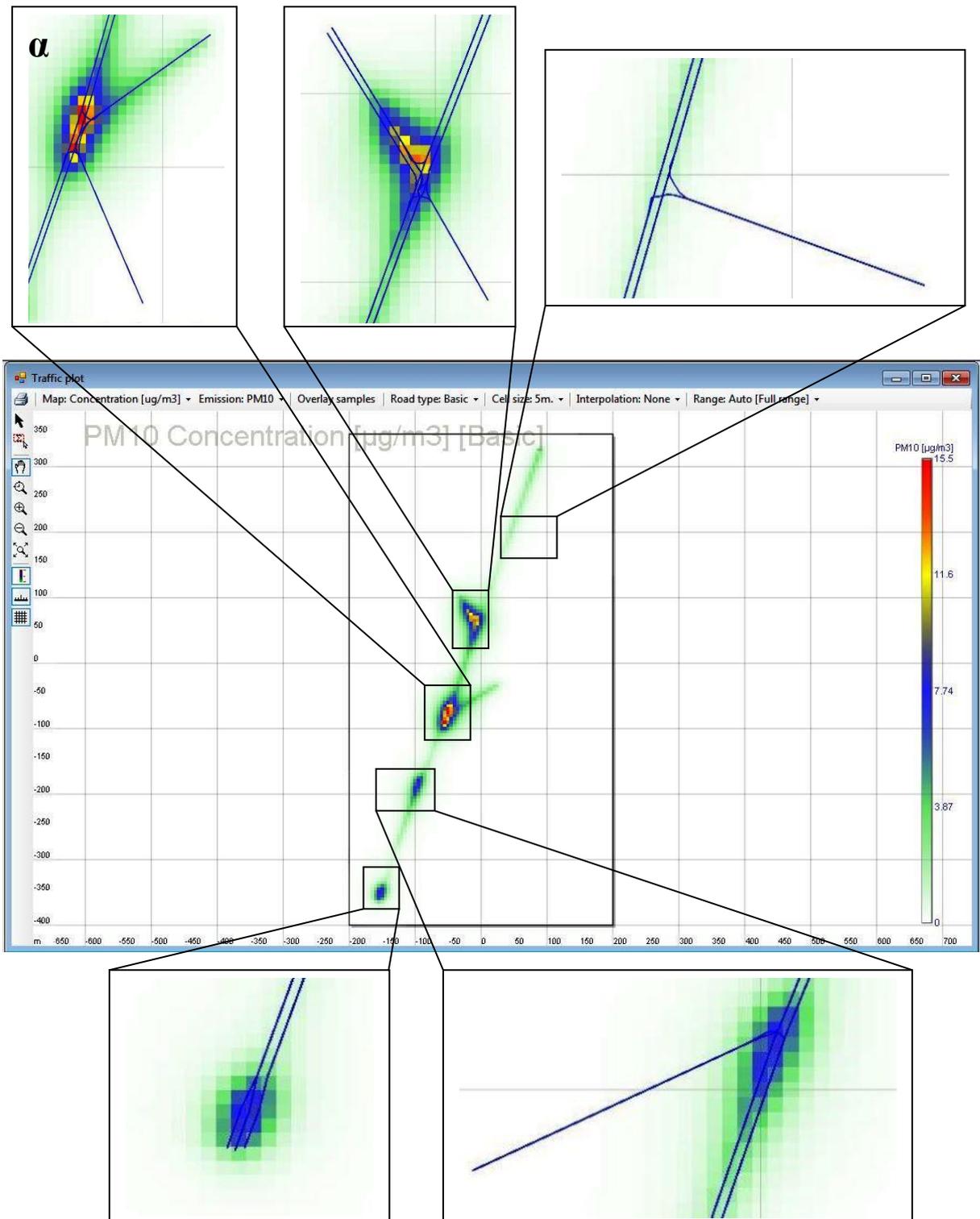


Figura 5.14 – Concentração de emissões de PM_{10} [$\mu g/m^3$] da rede em geral e respectivos cruzamentos.

As partículas finas (partículas com menos de 10 micrómetros (μm) de diâmetro) são um dos principais poluentes com efeito na saúde humana. Quando inalados penetram no sistema respiratório causando sérios danos, o que faz com que seja considerado um poluente local. Um exemplo de partículas finas são as PM_{10} (partículas com diâmetro equivalente inferior a 10 μm).

Observando os mapas das emissões para as PM_{10} verifica-se que seguem a mesma tendência dos mapas das emissões de CO_2 e NO_x , ou seja, ocorre maior libertação de PM_{10} nos cruzamentos, nas zonas de velocidade reduzida e nas subidas. Mais uma vez, o cruzamento mais a Norte não apresenta emissões significativas deste poluente e nas ruas com inclinação negativa (descidas) as emissões de PM_{10} são quase nulas.

O cruzamento α (intersecção da Rua Teixeira de Carvalho e da Rua Pinheiro Chagas com a Avenida Dom Afonso Henriques) é o ponto mais crítico da rede, pois é onde se registam os valores máximos de emissões. O quadro 5.2 sumariza os valores máximos para os três poluentes no cruzamento α .

	CO_2	NO_x	PM_{10}
Emissões Totais [g]	3796	8,452	0,8041
Emissões [g/km]	1310	2,917	0,2775
Concentração [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	72560	162,7	15,55

Quadro 5.2 – Valores das emissões no ponto mais crítico da rede (cruzamento α).

Analisando o quadro 5.2 e de acordo com a base de dados *online* sobre a qualidade do ar da Agência Portuguesa do Ambiente para o ano de 2010 a concentração de PM_{10} obtida é classificada como muito boa, uma vez que o valor obtido ($15,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) encontra-se entre 0 e $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (QUALAR, 2013).

5.3 Módulo HBEFA

O valor das emissões acumuladas para CO_2 , NO_x e PM_{10} recorrendo ao módulo HBEFA para o estudo de caso é apresentado na tabela 5.2. Tal como já referido estes valores são referentes à frota de 2010 da Alemanha, uma vez que o módulo EnViVer utilizado só está calibrado para a frota de 2010 da Holanda. Não sendo possível utilizar a mesma frota para os dois modelos de simulação, já que o modelo de macro simulação não dispunha da base de dados frota

Holandesa, optou-se por selecionar a Alemanha, pois as frotas dos dois países são mais próximas.

CO ₂	NO _x	PM ₁₀
93953,76 g	182,89 g	6,21 g
164,83 g/vei×km	0,32 g/vei×km	0,01 g/vei×km

Quadro 5.3 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente, através do módulo HBEFA para a hora de ponta da manhã.

5.4 Módulo EnViVer VS Módulo HBEFA

A tabela 5.3 apresenta os valores das emissões acumuladas por tipo de poluente para o estudo de caso para o módulo EnViVer (micro simulação) e para o módulo HBEFA (macro simulação).

	CO ₂	NO _x	PM ₁₀
EnViVer	132290,00 g	289,48 g	29,11 g
	232,09 g/vei×km	0,51 g/vei×km	0,051 g/vei×km
HBEFA	93953,76 g	182,89 g	6,21 g
	164,83 g/vei×km	0,32 g/vei×km	0,01 g/vei×km
Δ	40,80%	58,28%	368,76%

Quadro 5.4 – Valores das emissões acumuladas por tipo de poluente para os módulos EnViVer e HBEFA.

Dado que os dois modelos utilizam métodos de cálculo diferentes era de esperar que os resultados obtidos fossem diferentes. Contudo, e tratando-se da simulação de uma mesma realidade, seria também de esperar que os resultados, apesar de diferentes, fossem coincidentes. Os resultados obtidos para a Avenida Dom Afonso Henriques revelam uma discrepância significativa entre os dois modelos. Todos os poluentes são, aparentemente, subestimados pelo modelo macro. Os resultados obtidos pelos dois modelos para as emissões de CO₂ e de NO_x diferem na mesma ordem de grandeza, sendo respetivamente 41% e 58%

mais elevados quando estimados pelo modelo micro. Já para as emissões de partículas PM_{10} , as diferenças são bem mais substanciais, as emissões do Enviver são 369% maiores do que as do HBEFA.

A discrepância de resultados não pode ser apenas explicada a partir deste estudo. Para tirar ilações mais conclusivas será necessário efetuar outros estudos e verificar se os padrões de diferença se matêm. Algumas causas prováveis podem, no entanto, ser avançadas:

- O modelo de cálculo de emissões utilizado pelo VISUM poderá não ser o mais adequado ou não estar corretamente calibrado para captar as emissões de PM_{10} .
- As bases de dados de emissões utilizadas pelos dois *softwares* não são compatíveis, isto é têm conclusões distintas. Nesse caso teria de se analisar qual a que simula com maior realismo a realidade.
- As emissões de partículas PM_{10} poderão ser mais sensíveis às características específicas dos elementos da rede rodoviária, sendo que estes encontram uma caracterização muito mais detalhada no caso da micro simulação. Este fato, a ser real, justificaria por si só as diferenças de valores encontrados para a micro e macro simulação e aponta a primeira técnica como sendo a mais indicada para meio urbano, sob pena de se cometerem erros muito significativos com a macro-modelação.

A micro simulação é um tipo de modelo de simulação que modela veículo a veículo e tem em conta o comportamento do condutor, o que faz com que seja um modelo mais rigoroso quando comparado com a macro simulação que modela fluxos agregados de veículos por unidade de tempo, pelo que as emissões produzidas recorrendo a *softwares* de micro simulação esperam-se que sejam mais fiáveis e realistas.

6. CONCLUSÕES

Actualmente, os transportes continuam a ser uma das principais fontes de poluentes atmosféricos trazendo consigo um vasto conjunto de consequências graves, quer para o ambiente, quer para a saúde pública. Ainda que muitas metas se tenham conseguido alcançar no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir as emissões de poluentes para a atmosfera, o forte crescimento verificado ao nível das infraestruturas rodoviárias e o aumento do número de veículos em circulação, especialmente em países em vias de desenvolvimento, têm dificultado a tarefa de reduzir as externalidades ambientais negativas dos transportes.

Os modelos de cálculo das emissões constituem uma importante ferramenta que permite obter informação quantitativa sobre os poluentes emitidos e suas fontes sendo assim um importante instrumento de apoio à decisão e formulação de políticas nesta área. Assim, a necessidade de cumprir com os requisitos legais estabelecidos para o sector das emissões deverá traduzir-se em tomadas de decisão importantes ao nível do planeamento de novas infraestruturas rodoviárias e em novas estratégias políticas ao nível do sector dos transportes. Além disso, os resultados provenientes da modelação das emissões constituem por si só, uma fonte de informação de grande importância para a sua aplicação noutras ferramentas, como é o caso dos modelos de qualidade do ar.

Esta dissertação teve dois objectivos principais. Um deles era estimar emissões poluentes recorrendo a um *software* de micro simulação (VISSIM) e o módulo de cálculo de emissões acoplado (EnViVer 3.6). O segundo objectivo era comparar as diferenças das emissões produzidas utilizando modelos de micro e macro simulação, para o estudo de caso. O modelo de emissões utilizado na macro simulação foi o HBEFA 3.1. Utilizou-se uma versão beta do modelo EnViVer (versão ainda não comercial) o que não possibilitou introduzir a frota específica da área de estudo. Este problema foi contornado utilizando uma das frotas pré-definidas da base de dados do EnViVer. Neste momento, a versão final (comercial) do *software* está ainda na fase de testes. Esta versão permitirá escolher a frota específica para cada estudo.

O estudo de caso foi realizado em meio urbano (Coimbra), mais precisamente na Avenida Dom Afonso Henriques, onde o tráfego automóvel é mais intenso. Foi definido um único intervalo de tempo, hora de ponta da manhã, onde por norma os níveis de emissões são mais elevados. Da análise dos mapas de emissão produzidos pelo EnViVer para a Avenida em causa foi possível observar que todos os poluentes se comportavam de forma semelhante. As emissões são mais elevadas nos cruzamentos, zonas de velocidade reduzida e nas subidas

(inclinações positivas). Nos segmentos com inclinação descendente as emissões são negligenciáveis.

A análise dos resultados obtidos revela que os valores de emissões dos três tipos de poluentes considerados é significativamente superior no caso da micro simulação relativamente à macro simulação. Na verdade, as emissões de CO₂ e de NO_x são cerca de 41% e 58% superiores aos valores obtidos na macro simulação respetivamente. Análises futuras apresentando os mesmos resultados poderão indicar que há um subestimação das emissões calculadas usando modelos macro. Já relativamente ao cálculo de emissões de partículas PM₁₀ a diferença é gritante, sendo o valor calculado pela micro simulação cerca de 369% superior ao valor calculado pela macro simulação. A confirmar-se esta tendência, poderá significar que os modelos de cálculo utilizados nos modelos de macro simulação para este poluente estão longe da realidade, seja pelo modelo de cálculo das emissões em si ou pela falta de integração dos dados de tráfego com os restantes elementos da rede.

A vantagem de se usar uma rede de tráfego pequena foi proporcionar um maior controlo do tráfego, uma vez que para modelo de macro simulação não havia opção de escolha de percursos para chegar ao mesmo destino. A comparação dos resultados obtidos deve ser feita com alguma moderação já que as frotas utilizadas não coincidem totalmente. Enquanto que na macro simulação foi utilizada a frota da Alemanha para 2010, na micro simulação foi utilizada a base de dados disponível na versão beta do EnViVer, *light duty city* que corresponde à frota ligeira da Holanda. Ainda que as frotas sejam consideradas equivalentes, as diferenças podem condicionar os resultados. Este aspeto poderá, no entanto, ser testado logo que a versão comercial do EnViVer esteja disponível. A nova versão dará a possibilidade de alterar a frota de forma a ser possível seleccionar-se para ambos os modelos a mesma frota, possibilitando uma análise mais rigorosa e uma comparação entre ambos mais realista.

Uma das grandes dificuldades no cálculo de emissões dos modelos tradicionais reside na falta de integração das informações de tráfego, com o tipo de estrada e as características específicas que influenciam a dispersão das emissões provenientes do tráfego, como sejam: os edifícios circundantes, as condições meteorológicas, a direção e velocidade do vento, etc. O EnViVer suprime grande parte destas barreiras ao possibilitar uma integração plena do módulo de cálculo de emissões com o modelo de transportes do VISSIM.

Espera-se que os resultados obtidos no estudo levado a cabo durante esta dissertação sejam, pelo menos, auspiciosos relativamente à mais-valia do que pode ser a utilização de modelos de micro simulação para a obtenção de dados de emissões automóveis mais reais e detalhados, nomeadamente nas zonas de cruzamento, rotundas, semáforos e rodovias congestionadas. A confirmação carece ainda assim de mais estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), (2012). “Relatório do Estado do Ambiente 2012”, Portugal.
- Brozowski, K. (2006). “Multipoint source method in air pollution modelling of cold start emission”. *Environmental modeling and assessment*, Vol. 11, Number 4, pp. 371-380.
- CENSOS (2011). “Censos 2011 Resultados Definitivos – Região Centro”. ISBN 978-989-0184-0, Portugal.
- Coelho, M., Farias, T. e Roupail, N. (2005). “A methodology for modelling and measuring traffic and emission performance of speed control traffic signals”. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 2367-2376.
- Coelho, M., Farias, T. e Roupail, N. (2006). “Effect of roundabout operations on pollutant emissions”. *Transportation Research Part D*, Vol. 11, pp. 333-343.
- Commission of the European Communities (2007). “Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council: Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles”. 2007/0297, Bruxelas.
- Correia, G. (2012). “Apontamentos da disciplina de Planeamento de Transportes/Transportes e Ambiente”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ferreira, A. (2012). “Estimação e representação geográfica de emissões em meio urbano na cidade de Coimbra”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Graz University of Technology (GUT), (2009). “Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3”. Report N. I-20/2009, Áustria.
- Instituto Nacional de Estatística, I.P. (INE), (2012). “Estatísticas do Ambiente 2011”, Portugal.
- Ligterink, N.E., De Lange, R. (2009). “Refined vehicle and driving-behaviour dependencies in the VERSIT+ emission model”. In: *Proceedings of the Joint 17th Transport and Air Pollution Symposium and 3rd Environment and Transport Symposium*, Toulouse, França.

TERM (2012). “The contribution of transport to air quality – TERM 2012: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe”. Report N. 10/2012, Luxemburgo.

UN (United Nations). 2008. “Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount”. Information Services of the United Nations Framework Convention on Climate Change Secretariat, ISBN 92-9219-055-5.

VISUM Status and Perspectives – Version 11.5 (2010) – Professional Transportation Planning Vision. Alemanha.

VISSIM User Manual - Version 5.40 (2012). PTV Planung Transport Verkehr AG. Alemanha

Wiedemann, R. (1974) “Simulation des Strassenverkehrsflusses”, Schriftenreihe Heft 8, Institute for Transportation Science, University of Karlsruhe, Alemanha.

Sites da Internet

BLOGERS (2013). <http://www.bloggers.com.br/poluicao-atmosferica-resumo/>. Bloggers, Brasil

EMISIA (2013). <http://www.emisia.com/copert/General.html>. Emisia Missin for Environment, Grécia.

INFRAS (2013). <http://www.infras.ch/e/projekte/displayprojectitem.php?id=624>. Knowledge Pool for Solutions for the Future, Suíça.

IPAM (2013). <http://www.ipam.org.br/saiba-mais/abc/mudancaspergunta/20/20/10>. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Brasil.

PTV GROUP VISUM (2013). http://visiontraffic.ptvgroup.com/fileadmin/files_ptvvision/Downloads_N/0_General/2_Products/1_PTV_Visum/EN_PTV_Visum_Modules.pdf. PTV VISUM – Modules, Alemanha.

PTV GROUP VISSIM (2013). http://visiontraffic.ptvgroup.com/fileadmin/files_ptvvision/Downloads_N/0_General/2_Products/2_PTV_Vissim/EN_PTV_Vissim_Modules.pdf. PTV VISSIM – Modules, Alemanha.

QUALAR (2013) .http://www.qualar.org/INDEX.PHP?page=1&subpage=7&ano_esc=2013

TERRA (2013). <http://noticias.terra.com.br/ciencia/clima/conferencia-de-doha-estende-protocolo-de-kyoto-ate-2020,c008d47ae958b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Terra Networks, Brasil.

TNO (2013). http://www.TNO.nl/content.cfm?Context=thema&content=prop_case&laag1=894&laag2=914&laag3=105&item_id=853&Taal=2. TNO - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Holanda.

UNFCCC (2013). http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. United Nations Framework Convention on Climate Change, Alemanha.

WIKIPEDIA (2013). http://pt.wikipedia.org/wiki/Di%C3%B3xido_de_carbono