

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Um Simulador de Tráfego para o Estudo do Ruído

Valquíria da Silva Fortuna

Licenciada em Matemática
pela Faculdade de Ciências
da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Estatística Aplicada e Modelação

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor Francisco José Lage Campelo Calheiros,
da Secção de Matemática e Física do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Julho de 2006

Resumo

O ruído ambiental e o ruído de tráfego em particular, é um desconforto que se faz sentir essencialmente nas sociedades desenvolvidas tecnologicamente.

Nos dias de hoje praticamente todas as famílias possuem um veículo automóvel, muitas vezes mais do que um.

A melhoria da qualidade de vida pelo aumento de mobilidade é drasticamente diminuída pelas suas consequências: poluição do ar, ruído, stress, entre outras.

Para esta tese construiu-se, de raiz, um simulador de tráfego em *Visual Basic* que inclui a visualização do tráfego e a possibilidade de se exportar dados para uma folha de cálculo.

Como saídas (output) pode obter-se resultados relativos ao tráfego e ao ruído por ele produzido em diferentes condições que se exemplificam. Testou-se o simulador comparando com trabalhos anteriores.

Palavras chave: simulação estocástica, autómatos celulares, tráfego, ruído de tráfego, mecânica estatística.

Abstract

Technological societies are annoyed by environmental noise, and particularly by traffic noise.

Today in those societies nearly everybody has a car. This leads to a greater mobility but also to higher exposure to air pollution, noise, stress, etc.

A traffic simulator was built, from the beginning, using *Visual Basic* that includes a visual *interface* with moving traffic and data organization for worksheets.

As outputs, results about traffic and noise characteristic are available for different input parameters.

The simulator was tested against bibliographical results and experimental data.

Keywords: stochastic simulation, cellular automata, traffic, traffic noise, statistical mechanic.

Agradecimentos

O meu mais sincero agradecimento é dedicado ao meu orientador e Professor Doutor Francisco Calheiros pelo incentivo, pela indicação das decisões a tomar nos momentos de maior dificuldade e pelo auxílio em escrever alguns trechos deste trabalho. Agradeço, principalmente, pela confiança em mim depositada, no meu trabalho, pela disponibilidade e amizade que sempre dispensou.

Quero agradecer à Graça Oliveira, colega e amiga, pela disponibilidade sempre manifestada e pela amizade de longa data.

Quero dirigir um agradecimento ao Engenheiro António Eduardo Baptista da Costa do Laboratório de Acústica da FEUP pela amabilidade que teve em fornecer as fotos dos sonómetros e pelas inúmeras vezes que nos (a mim e ao meu orientador) recebeu e pelo que nos ensinou.

Agradeço à minha família, em particular aos meus pais e irmã, que sempre esteve comigo apoiando-me em todas as horas, obrigada pelo incentivo e carinho e... especialmente ao meu marido e amigo José Carlos pela paciência e compreensão reveladas.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contexto e apresentação do problema	1
1.2	Objectivos e limitações do estudo	3
1.3	Estrutura e organização da dissertação	5
2	Autómatos Celulares	6
3	Modelos de Tráfego	8
3.1	Tráfego de veículos	8
3.2	Modelos	8
3.2.1	Modelo de Lárraga	9
3.2.2	Modelo de Sven Maerivoet	10
3.2.3	Modelo de Nagel e Schreckenberg	11
4	Elementos sobre o Ruído	13
4.1	Conceito de ruído	13
4.2	Tipos de ruído	14
4.3	Princípios básicos	15
4.4	Parâmetros estatísticos de ruído	20
5	Ruído de Tráfego	21
5.1	Caso de uma única fonte sonora	21
5.2	Caso de várias fontes sonoras não correlacionadas	28
6	O Simulador	31
6.1	Descrição do simulador	31
6.1.1	Simulador de tráfego	32
6.1.2	Gerador de tempo de simulação	33
6.1.3	Movimento do veículo	37

6.2 O simulador	38
6.3 Limitações do simulador	41
6.4 Conclusões.....	41
7 Explorações e testes ao simulador de tráfego.....	42
7.1 Comparações com os resultados de Calheiros, Faria e Rodrigues	42
7.1.1 Veículos ligeiros.....	43
7.1.2 Veículos ligeiros e pesados.....	44
7.2 Comparação com o tráfego numa auto-estrada parisiense	50
7.3 “Semáforo” e/ou obstáculo.....	53
7.3.1 Uma paragem no “semáforo”	53
7.3.2 Um obstáculo.....	54
7.3.3 Uma paragem no “semáforo” e um obstáculo	56
Conclusões.....	57
Referências Bibliográficas.....	58
Anexos.....	62
Anexo A: Programa <i>Tráfego</i>	63
Anexo B: Tabelas de dados	81

Índice de figuras

Figura 1 – Exposição ao ruído da população portuguesa.....	2
Figura 2 – A escala de valores de nível de pressão sonora varia entre 0 dB e 130 dB..	3
Figura 3 – Propagação de uma onda de som.....	16
Figura 4 – Exemplos de curvas produzidas pelo ruído de diferentes veículos.....	23
Figura 5 – Esquema do espaço decorrido acima do ruído de fundo.....	23
Figura 6 – Representação de $\frac{1}{10^{\frac{L_A}{10}}}$ em função de x^2 e respectiva recta de regressão.	26
Figura 7 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,3 de 300 veículos, dos quais 32 são veículos pesados.....	29
Figura 8 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,3 de 300 veículos, dos quais 25 são veículos pesados. Paragem, 50 posições, antes da medição do nível de pressão acústica durante 100 instantes.....	29
Figura 9 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,1 de 150 veículos, dos quais 18 são veículos pesados. Paragem, 50 posições, antes da medição do nível de pressão acústica durante 100 instantes.....	30
Figura 10 – Autómato celular de dimensão 1.....	31
Figura 11 – Exemplo de uma iteração.....	37
Figura 12 – Exemplo de uma <i>Interface</i> (inicial) do programa <i>Tráfego</i>	39
Figura 13 – Exemplo de uma <i>Interface</i> (actual) do programa <i>Tráfego</i>	39
Figura 14 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego para uma velocidade de entrada dos pesados de 30 km/h.....	45
Figura 15 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego para uma velocidade de entrada dos pesados de 50 km/h.....	45
Figura 16 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego.....	46
Figura 17 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com elevadas percentagens de veículos pesados e a intensidade de tráfego.....	47

Figura 18 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a proporção de veículos pesados e o parâmetro de instabilidade para uma intensidade de tráfego de 0,1133.	48
Figura 19 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo.....	49
Figura 20 – Média dos instantes de entrada entre veículos consecutivos.	50
Figura 21 – Densidade de Tráfego em função da Velocidade. Boulevard Periphérique - PARIS, 11 e 12 de Maio de 1997	50
Figura 22 – Em (a) e (b) está representada a velocidade (km/h) em função do débito (n.º de veículos/h), em (a) pontos ligados e em (b) pontos isolados.....	51
Figura 23 – Enviesamento em função do "Achatamento" para subamostras de 100 veículos.	51
Figura 24 – Enviesamento em função do "Achatamento" para subamostras de 30 veículos... ..	52
Figura 25 – Desvio-padrão em função da Média. PARIS subamostras de 100 veículos. (1) – Tráfego rápido e pouco denso. (2) – Tráfego rápido e denso. (3) – Tráfego lento e congestionado.	52
Figura 26 – Desvio-padrão em função da média em km/h para subamostras de 30 veículos. (1) – Tráfego rápido e pouco denso. (2) – Tráfego rápido e denso. (3) – Tráfego lento e congestionado.	53
Figura 27 – Instantes de entrada e saída da via de cada veículo, quando implementado um "semáforo".....	54
Figura 28 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo, quando implementado um "semáforo".....	54
Figura 29 – Instantes de entrada e saída de cada veículo, quando implementado um obstáculo.	55
Figura 30 – Instantes de entrada e saída para os 40 primeiros veículos, quando implementado um obstáculo.....	55
Figura 31 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo, quando implementado um obstáculo.....	55
Figura 32 – Instantes de entrada e saída da via de cada veículo, quando implementado um "semáforo" e um obstáculo.	56
Figura 33 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo, quando implementado um "semáforo" e um obstáculo.	56

Índice de tabelas

Tabela 1 – Elementos retirados das fotos.	23
Tabela 2 – Nível de pressão acústica segundo o gráfico de Leclercq (2002).....	26
Tabela 3 – Correspondência entre velocidade em número de células e velocidade em km/h de Susana Faria.....	42
Tabela 4 – Correspondência entre velocidade em número de células e velocidade em km/h..	43
Tabela 5 – Distribuições estatísticas de várias intensidades de tráfego.	44
Tabela 6 – Distribuição dos tempos de chegadas para diferentes intensidades de tráfego.	44
Tabela 7 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidades médias.....	81
Tabela 8 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidade média do trajecto.	81
Tabela 9 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidade média do trajecto.	82
Tabela 10 – Relação entre intensidade de tráfego, o parâmetro de instabilidade e a percentagem de pesados.	82

Lista de abreviaturas

DGA – Direcção Geral do Ambiente

IA – Instituto do Ambiente

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RGR – Regulamento Geral do Ruído

IMAGINE – Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment

SEPA – Scottish Environment Protection Agency.

MET – Ministère de l'Équipement et des Transports

STCA – Stochastic Traffic Cellular Automaton Model

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho”*

Albert Einstein

1 Introdução

1.1 Contexto e apresentação do problema

O ruído incomoda, perturba, interfere no rendimento do trabalho e prejudica a saúde e o bem-estar.

Segundo estudos feitos, se o ruído não compromete o sistema auditivo das pessoas, causa sérios prejuízos além de provocar distúrbios psicológicos a diferentes níveis.

Nos dias de hoje é difícil encontrar alguém que não queira morar ou trabalhar em “silêncio”.

Estudos realizados revelam que o ruído assume lugar de relevo no conjunto das preocupações dos portugueses com o ambiente.

Um inquérito Nacional, com o título “Os Portugueses e o ambiente” elaborado pelo Instituto do Ambiente, mostra que em 2000 inquiridos as repostas mais frequentes à questão “o que vai piorar nos próximos 10/15 anos?” são: trânsito (78,7%), qualidade do ar (70%) e ruído (66%).

Em 1996 foi publicado um estudo, “Ruído Ambiente em Portugal”, estimando que apenas 43% da população usufruía de conforto acústico médio nos locais de residência e 19% merecia mesmo preocupação; as situações mais graves surgiam junto das principais vias de tráfego rodoviário ou dos grandes centros urbanos e respectivas periferias.

A figura 1 mostra a exposição ao ruído da população portuguesa, de acordo com os dados da Direcção Geral do Ambiente (DGA, 1996).

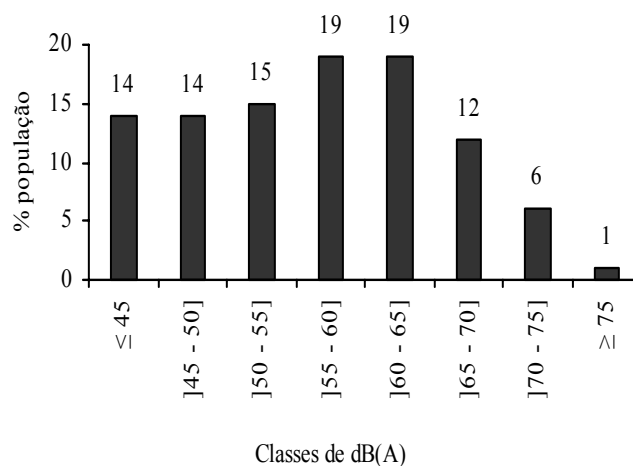


Figura 1 – Exposição ao ruído da população portuguesa. Fonte: DGA, 1996

Segundo a Organização Mundial de Saúde o limiar da incomodidade situa-se cerca dos 50 dB(A) (L_{eq} diurno)¹ e poucas pessoas são verdadeiramente incomodadas por valores até 55 dB(A). No período nocturno os níveis sonoros devem situar-se 5 a 10 dB abaixo dos valores diurnos para garantir um ambiente sonoro equilibrado (Instituto do Ambiente).

As leis em vigor visam a protecção dos cidadãos, relativamente à poluição sonora, encontram-se descritas no Regime Legal sobre a Poluição Sonora (Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro) e na Lei de Bases do Ambiente.

¹ *Decibel* é a unidade usada para medir a intensidade do som, representa um décimo de Bel. É uma razão logarítmica entre a pressão sonora verificada e o valor de referência. Usualmente, utiliza-se o decibel corrigido com um filtro de ponderação, A, de frequências, dB(A).

L_{eq} é o nível sonoro contínuo equivalente que é sempre reportado a um intervalo de tempo (*equivalent noise level*).

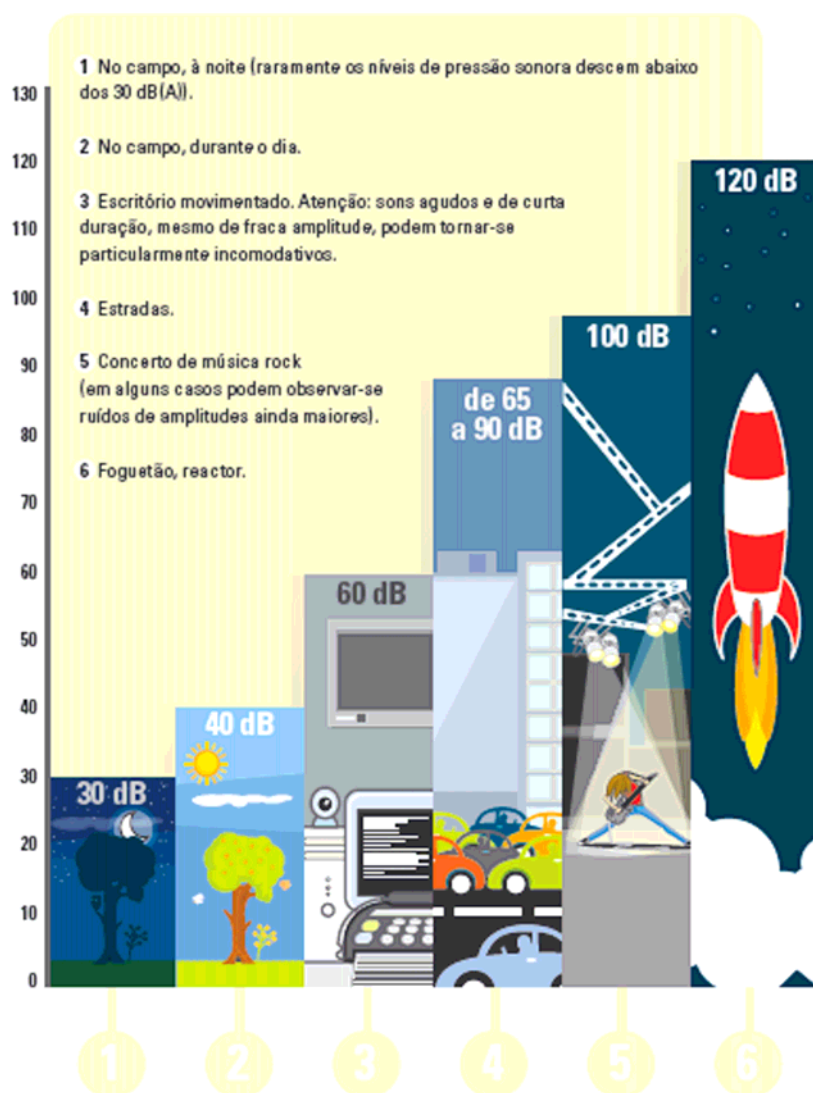


Figura 2 – A escala de valores de nível de pressão sonora varia entre 0 dB e 130 dB. Fonte: Instituto do Ambiente (2006).

1.2 Objectivos e limitações do estudo

O objectivo principal deste trabalho é a criação de um simulador de tráfego automóvel realístico, e a partir dele avaliar o ruído de tráfego.

Num artigo do Projecto Imagine (2005) vêm discutidas, pelos seus autores, as qualidades e os defeitos de alguns simuladores, académicos ou comerciais, do tráfego e do seu ruído.

Quase todos revelam insatisfação com a insuficiência de detalhe temporal, isto é, arredondamento dos picos; em particular as noites ficam quase sempre mal representadas.

Alguns modelos exigem uma enorme colecção de dados. O pequeno detalhe espacial e / ou a pouca exactidão nos resultados são defeitos comumente referidos.

Muito poucos prevêem a possibilidade de calibração do modelo. Há muito poucas experiências concretas do seu uso efectivo.

Nenhum deles com origem portuguesa.

Uma ideia deste projecto é ajudar a “empurrar os portugueses para a linha da frente”.

Um dos objectivos é diminuir a dependência de programas estrangeiros, dispendiosos e nos quais não é possível alterar as variáveis.

Por isso foi construído um simulador de base com características explícitas e que facilmente pode ser alterado.

O trabalho desta tese não é só o texto mas sobretudo este simulador.

A não disponibilidade de uma fórmula correspondente ao ruído produzido por um veículo individual foi uma das principais surpresas / obstáculos a este trabalho. A preocupação de alguns engenheiros com o cumprimento da lei sem qualquer preocupação com a Física ou a Psicologia do ruído foi também uma surpresa.

O objectivo deste trabalho não é cumprir a lei mas sim calcular efectivamente o ruído.

O ruído pode ser avaliado economicamente e pode até ser economicamente justificada a sua redução.

O programa desenvolvido neste trabalho ou um idêntico permite avaliar o ruído antes da efectiva construção de uma obra.

O simulador construído, tem por base autómatos celulares, e foi implementado em *Microsoft Visual Basic 6.0*. A escolha desta linguagem deve-se à facilidade de desenvolvimento e, em especial, à facilidade de manuseamento por parte do utilizador.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em duas partes. Uma primeira parte constituída pelos capítulos 2, 3 e 4 nos quais se faz uma revisão de alguns conceitos necessários a uma melhor compreensão do tema. Numa segunda parte constituída pelos restantes capítulos que tratam da construção e análise do modelo desenvolvido neste trabalho, o qual se destina à avaliação do ruído de tráfego.

No segundo e quartos capítulos, faz-se uma exposição de conceitos básicos indispensáveis para este trabalho.

No terceiro capítulo, faz-se uma apresentação de três modelos de simulação de tráfego.

No quinto capítulo, faz-se uma pequena exploração ao ruído individual de um veículo e de um conjunto de veículos.

No sexto capítulo, faz-se a descrição do modelo desenvolvido neste trabalho.

No sétimo capítulo, apresentam-se explorações do programa desenvolvido neste trabalho.

Este texto termina com a apresentação das conclusões gerais do estudo e são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

2 Autómatos Celulares

Neste capítulo, é apresentado o conceito de autómato celular indispensável ao nível da implementação do modelo de simulação apresentado no capítulo 6.

O conceito matemático de autómato celular foi introduzido por Johann Louis von Newman, em meados de 1947, quando tentava desenvolver um modelo abstracto de auto-reprodução em biologia (Wolfram, 1982). No entanto, um dos exemplos mais famosos de autómato celular surgiu, no início da década de 70, sob a forma de um jogo de computador – O Jogo da Vida (*The Game of Life*) – desenvolvido por John Horton Conway. Baseou-se num conjunto de regras simples, e em células que podem assumir apenas dois estados (viva ou morta) ele mostrou que é possível criar-se sistemas bastante complexos com um comportamento semelhante à vida orgânica.

Recentemente, os autómatos celulares têm sido utilizados para modelar inúmeros fenómenos, desde fenómenos físicos até toda uma variedade de outros fenómenos.

Só para citar alguns autores portugueses com passagem recente na FEUP: Francisco Calheiros, Susana Faria e Carlos Rodrigues (1998), no estudo de tráfego e Graça Oliveira (2005) na simulação de fogos florestais.

Autómatos celulares são sistemas dinâmicos com espaço, tempo e estado do sistema discretos. O espaço é representado por uma rede (*grid* ou *lattice*) uniforme e o tempo avança em passos discretos. Cada célula encontra-se num determinado estado, que se pode alterar a passos de tempo discretos, dependendo do seu próprio estado e do estado das suas vizinhas.

Foi escolhido um modelo de autómatos celulares dado a sua simplicidade e poder de modelação. Foi também escolhido pois já é usado com sucesso na modelação de tráfego (Nagel, entre outros autores).

A apresentação que aqui será feita de autómatos celulares é baseada no trabalho de Gutowitz (1988).

Os autómatos celulares podem ter uma ou mais dimensões. Um autómato celular de dimensão 1 é uma sequência finita ou infinita de células “unidas” em linha, sendo este o

usado neste trabalho. Um autômato celular de dimensão 2 é composto por células postas lado a lado cobrindo um plano ou parte de um plano. A mesma caracterização pode ser usada para autómatos celulares de maior dimensão.

Como os autómatos celulares são usados nas mais diversas disciplinas, existem então muitas formas de os definir.

3 Modelos de Tráfego

Neste capítulo, caracteriza-se o tráfego através de três modelos de simulação de tráfego que no fundo são variantes uns dos outros. Na descrição serão apontadas algumas noções básicas ao nível da simulação que serão indispensáveis para a implementação.

3.1 Tráfego de veículos

O tráfego de veículos é um fenómeno muito concreto. É algo a que nos habituamos de tal forma que raramente o analisamos em profundidade. Para este trabalho é necessário tentar analisá-lo e descrevê-lo de uma forma objectiva.

Comecemos por identificar os intervenientes estabelecendo uma relação entre eles:

- componentes dinâmicos: veículos
- componentes estáticos, as infra-estruturas: estradas; auto-estradas; rotundas
- sistemas de regulação de tráfego: os sistemas de regulação de tráfego alteram de alguma forma a movimentação dos veículos e existem sob a forma de:
 - sinalização vertical: semáforos
 - sinalização horizontal: faixas reservadas, vias para virar à esquerda; vias para virar à direita; vias de sentido único, etc.

Como existe uma grande diversidade de detalhes relacionados com o tráfego, será então necessário procurar algumas medidas objectivas para o caracterizar.

Para simplificar, neste trabalho apenas será considerado tráfego numa via com sentido único em que não são permitidas ultrapassagens. As extensões são fáceis de implementar se houver um modelo (por exemplo, ultrapassagens, paragens num semáforo, etc.).

3.2 Modelos

Foram analisados três modelos de modelação de tráfego.

Os três modelos analisados são estocásticos, isto é, todos os modelos consideram elementos estocásticos nas suas evoluções (Maerivoet, S.; Moor, B., 2005).

3.2.1 Modelo de Lárraga

Este modelo é um modelo de autómatos celulares probabilísticos. Consiste no movimento de N veículos numa rede unidimensional com L células. Espaço, tempo e velocidade são discretas. Cada célula está livre ou ocupada por um único veículo com velocidade v . Velocidade assume valores de $0, \dots, v_{\max}$ (sendo este o limite de velocidade) dependendo do tipo de veículo. A velocidade é equivalente ao número de células que o veículo avança na etapa seguinte, desde que não hajam obstáculos.

Cada veículo apenas se movimenta numa direcção.

Sejam

v_i velocidade actual veículo i ;

x_i posição do veículo i ;

v_p velocidade do veículo que segue à frente do veículo i ;

x_p posição do veículo que segue à frente do veículo i ;

d_i distância entre o veículo i e o veículo p , ou seja, $d_i = x_p - x_i - 1$

num determinado momento.

As unidades no modelo são: $[d]$ = número de células, $[v]$ = número de células por unidade de tempo, $[t]$ = número de instantes, etc. Fazendo $\Delta t = 1$, v pode ser considerado como tendo por unidades o número de células sem referência ao tempo. Surgem então um grupo de regras que se aplicam em simultâneo a todos os veículos.

Regra 1: Aceleração – cada veículo acelera uma unidade até atingir a velocidade máxima.

$$\text{Se } v_i < v_{\max} \text{ então } v_i \rightarrow \min \{v_i + 1, v_{\max}\}$$

Regra 2: Aleatório (*randomization*) – cada veículo desacelera, aleatoriamente, uma unidade de acordo com uma probabilidade fixa.

Se $v_i > 0$ então $v_i \rightarrow \max \{v_i - 1, 0\}$ com probabilidade R , esta é um parâmetro de instabilidade do tráfego.

Regra 3: Desaceleração – cada veículo deve manter uma distância de segurança para o veículo da frente.

$$\text{Se } (d_i + (1 - \alpha)v_p) < v_i \text{ então } v_i \rightarrow \min \{v_i, d_i + (1 - \alpha)v_p\}$$

O termo $d_i + (1 - \alpha)v_p$ representa a distância de segurança entre veículos, sendo esta determinada pelo parâmetro α . O parâmetro assume valores compreendidos entre 0 e 1 (inclusive). Quando $\alpha = 1$ a velocidade do veículo da frente não é considerada no processo de desaceleração. Quando $\alpha = 0$ a velocidade do veículo da frente é considerada sem restrições, mantendo-se assim uma distância de segurança.

Regra 4: Movimento do veículo – cada veículo move-se em frente de acordo com a nova velocidade determinada nos passos 1 – 3.

$$x_i \rightarrow x_i + v_i$$

As regras 1, 2 e 3 permitem determinar a nova velocidade. A qual é usada na 4ª regra.

3.2.2 Modelo de Sven Maerivoet

Este modelo transforma as quatro regras básicas do modelo clássico estocástico usando autómatos celulares (STCA - *stochastic traffic cellular automaton model*) numa única regra.

Regras do STCA:

Regra 1: um veículo acelera uma unidade até atingir a velocidade máxima.

Regra 2: um veículo desacelera, evitando a colisão.

Regra 3: dada uma probabilidade p , os veículos desaceleram aleatoriamente.

Regra 4: cada veículo avança posições de acordo com a velocidade.

Estas quatro regras podem então ser reescritas numa só, resultando assim a expressão que se segue a qual transforma a velocidade em contínua (em vez de discreta).

$$v_t = p \min \{ v_{\max} - 1, v_t, g - 1 \} + (1 - p) \min \{ v_{\max}, v_t + 1, g \}$$

em que, p é o valor da probabilidade, v_{\max} velocidade máxima, v_t velocidade do veículo t e g número de células entre o veículo e o que segue imediatamente à sua frente.

3.2.3 Modelo de Nagel e Schreckenberg

Este modelo denomina-se por NaSch e permite reproduzir várias características do fluxo de tráfego real.

Este modelo transforma as quatro regras iniciais em três.

Regra 1: Aceleração e travagem – cada veículo acelera uma unidade até atingir a velocidade máxima mas evita a colisão.

$$v_i(t) \leftarrow \min \{ v_i(t-1) + 1, g_{si}(t-1), v_{\max} \}$$

em que, g_{si} representa o número de células livres.

Regra 2: Aleatório (*randomization*) – cada veículo desacelera, aleatoriamente, uma unidade de acordo com uma probabilidade fixa.

$$\xi(t) < p \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max \{0, v_i(t) - 1\}$$

em que, ξ representa um número aleatório entre 0 e 1 (inclusive) e p valor da probabilidade

Regra 3: Movimento do veículo – cada veículo move-se em frente de acordo com a nova velocidade determinada nos passos 1 – 3.

$$x_i(t) \rightarrow x_i(t - 1) + v_i(t).$$

4 Elementos sobre o Ruído

4.1 Conceito de ruído

O vocábulo ruído provem do latim “*rugitu*” que significa rugido. O ruído é definido como um som desagradável, isto é, um som que incomoda de alguma forma o bem-estar, físico e/ou psicológico do ser humano. O ruído, por vezes, pode também provocar danos físicos irreversíveis, nomeadamente neuroses e/ou lesões auditivas. Os danos causados pelo ruído estão ligados ao nível de pressão sonora, frequência e tempo de exposição.

Segundo Gerges (1992) o som e o ruído não são sinónimos. Um ruído é apenas um tipo de som, mas um som não é necessariamente um ruído. O conceito de ruído está associado a um som desagradável e perturbador enquanto que o som é definido com variação da pressão atmosférica dentro dos limites de amplitude e banda de frequências aos quais o ouvido humano responde.

A classificação de ruído é subjectiva, por exemplo, de um modo geral os “amantes” do desporto automóvel não consideram desagradável nem perturbador o barulho originado pelos motores dos automóveis de competição.

O ruído é a mistura de sons de diversas frequências e amplitudes que escapam à capacidade de discriminação do ouvido humano (Goelzer², 1986).

O som resulta de uma perturbação mecânica num meio elástico que, propagando-se, produz sensação ao atingir o ouvido humano.

O som é caracterizado pelas suas qualidades que são: a altura, a intensidade e o timbre. A altura do som, usualmente expressa em ciclos por segundo é a frequência da vibração, ou seja, a qualidade que distingue um som agudo (grande frequência) de um som grave (pequena

² Higienista profissional (Occupational Hygienist) membro da Organização Mundial de Saúde.

frequência). A intensidade do som, usualmente expressa em decibéis (dB), está ligada à amplitude das vibrações, é a qualidade pela qual um som forte (grande amplitude — muita energia) se distingue de um som fraco (pequena amplitude — pouca energia). O timbre distingue dois sons da mesma frequência e intensidade emitidos de fontes sonoras diferentes.

Para a análise do ruído de tráfego interessa apenas estudar a sua propagação através do ar. As perturbações em causa apresentam um comportamento ondulatório e correspondem a pequenas variações de pressão sonora.

O ruído do tráfego de veículos depende, essencialmente, do volume de tráfego, da velocidade de cada veículo e do tipo de veículo.

O ruído de um veículo é uma combinação de ruídos provenientes do motor, da saída de gases de escape, dos travões, do contacto dos pneus com o pavimento, entre outros.

Outros factores afectam de igual modo o ruído de tráfego, nomeadamente, tipo de piso da via, vegetação, barreiras (por exemplo, edifícios) e condições atmosféricas (vento, temperatura, humidade).

No caso do ruído a descrição com autómatos celulares é particularmente útil para obter as flutuações que são uma grande fonte de incómodo para os que vivem nas imediações da via. Ao contrário do que afirma Leclercq (2002) o tratamento das flutuações é possível e desejável. Ao contrário do que diz uma engenheira isto não é uma “aldrabice” para cumprir a lei. Trata-se de um fenómeno físico observável e como tal pode ser estudado.

Leclercq (2002, capítulo 7) compara os resultados com os valores de Guide du Bruit (GdB). Faz a avaliação do ruído por pelotões junto a um semáforo, mas de facto, a tese tem muito tráfego e pouco ruído.

4.2 Tipos de ruído

A transmissão de ondas sonoras pode dar-se directa ou indirectamente no ar.

O ruído pode ser classificado em som puro ou som complexo quando relacionado com o seu espectro de frequências.

Um som puro é constituído por uma única frequência enquanto que um som complexo é composto tem espectro de frequências.

Um ruído pode também ser classificado por estacionário ou não estacionário de acordo com a variação temporal.

Se as variações forem pequenas durante um período de observação significativo pode considerar-se ruído estacionário enquanto que se variar ao longo do tempo tem-se um ruído não estacionário. Este pode ainda ser designado de flutuante, intermitente ou impulsivo, conforme os casos.

Se o ruído variar continuamente durante o período de observação, denomina-se por ruído flutuante, como é o caso do ruído de tráfego. O ruído intermitente sofre interrupções regulares ou irregulares, durante certos períodos de tempo e mantendo-se constante durante períodos de um ou mais segundos. O ruído impulsivo é caracterizado por breves instantes de aumento, com duração, usualmente, inferior a um segundo.

4.3 Princípios básicos

Os conceitos e termos aqui apresentados foram baseados em “Horizontal Guidance for Noise – Noise Assessment and Control, part 2”.

Uma onda de som é caracterizada por um comprimento de onda, frequência e amplitude.

- **Comprimento de onda**

Cada vibração da fonte produz uma onda de pressão num meio elástico de transporte que, no caso do ruído é, usualmente, o ar.

O comprimento de onda é a distância entre as sucessivas ondas de pressão.

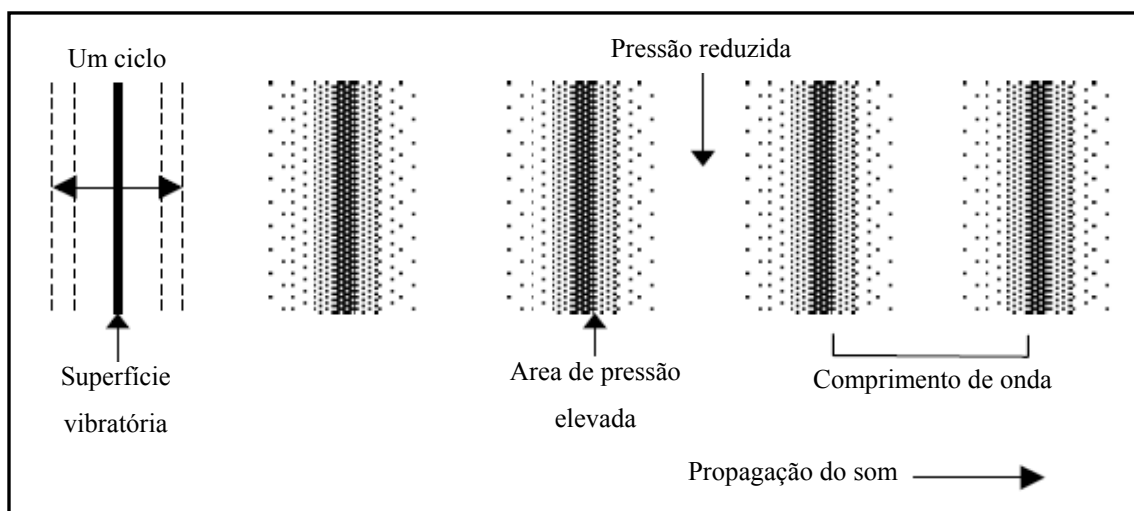


Figura 3 – Propagação de uma onda de som. Fonte: “Horizontal Guidance for Noise – Noise Assessment and Control, part 2” - SEPA.

- **Frequência**

A frequência é o número de vezes que a fonte vibra por unidade de tempo. Subsequentemente a onda de pressão tem a mesma frequência. É medida em ciclos por segundo (Hertz – Hz) e representa a “altura” do som. Duplicando a frequência produz-se um aumento aproximado de uma oitava.

A frequência é inverso do período, que é definido como sendo o tempo que demora a completar-se um ciclo ondulatório.

As frequências audíveis situam-se entre os 20 e os 20000 Hz, embora em determinadas condições o corpo humano possa “sentir” frequências mais baixas. É de referir, que a audição e as respostas do corpo, geralmente, variam consoante a frequência.

O ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências, sendo mais sensível às frequências que se situam entre os 2000 e os 5000 Hz e menos sensível para frequências extremamente altas ou baixas.

- **Amplitude**

A amplitude da onda sonora é metade da diferença entre a pressão máxima e a pressão mínima. A amplitude é expressa em unidades de pressão (micro pascal [μPa]). Usualmente, a amplitude é convertida em potência sonora (10^{-12} W) ou em intensidade sonora (10^{-12} W/ m^2).

- **Velocidade do som**

A velocidade na qual o som viaja depende do meio que o transporta, particularmente a sua elasticidade e densidade. A velocidade do som a uma temperatura do ar de 20°C é 344 m/s.

A velocidade está relacionada com a frequência e o comprimento de onda:

$$c = f \times \lambda$$

em que:

c – velocidade do som em metros por segundo

f – frequência em Hz

λ – comprimento de onda em metros.

Como a velocidade do som é constante para qualquer meio homogêneo, se a frequência aumenta então o comprimento de onda diminui.

- **Pressão sonora**

O ouvido humano responde à frequência do som ou intensidade. De um modo geral, o ruído ambiental é composto por diversas frequências ocorrendo simultaneamente denominando-se por nível de pressão sonora.

A variedade de pressões, desde o som mais baixo que conseguimos ouvir, até ao mais alto é muito grande. A pressão sonora audível varia entre $20\mu\text{Pa}$ (10^{-6} Pa) e 100 Pa, esta pressão sonora, tão elevada, causa dor. Testes de audição realizados demonstram que a mais baixa

pressão audível a 1000 Hz é de 2×10^{-6} Pa enquanto que a pressão sonora capaz de causar dor é de aproximadamente 200 Pa.

De modo a conseguir representar esta variedade de valores numa escala, com maior facilidade de representação, o nível de pressão sonora é, normalmente, expresso numa escala logarítmica e em decibéis (dB).

Assim, o nível de pressão sonora, L_p , medido em decibéis (dB), é dado por:

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_r} \right)^2 \text{ dB} \quad \text{ou} \quad L_p = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_r} \right) \text{ dB}$$

em que,

P é a amplitude das flutuações da pressão

$P_r = 20 \mu\text{Pa} = 20 \times 10^{-6}$ Pa é a pressão de referência, correspondente ao menor valor audível a 1000 Hz.

De um modo geral, o ruído ambiental corresponde a uma combinação de sons de uma larga banda de frequências. Os efeitos da absorção atmosférica e de atenuação por barreiras na transmissão do som estão fortemente dependentes das frequências sonoras. Os principais mecanismos geradores de ruído em determinadas fontes podem ser identificados através das frequências que produzem.

Para se avaliar o ruído ambiental é usual utilizar-se uma ponderação, A , para medições de níveis de pressão sonora, que se expressam em dB(A).

Assim, o nível de pressão sonora, L_{pA} , medido em dB, é dado por:

$$L_{pA} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_r} \right)^2 \text{ dB(A)} \quad \text{ou} \quad L_{pA} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_r} \right) \text{ dB(A)}$$

O ouvido humano converte as flutuações de pressão por minuto existentes no ar em sinais, que são transmitidos pelo nervo auditório para o cérebro, onde são percebidos como som.

Por isso é extremamente importante a utilização de frequências com ponderação A, a fim de se poder simular da melhor forma as condições do ouvido humano.

- **Potência do som (*Sound Power*)**

O nível de potência de som, L_w , é a energia proveniente de uma fonte e constitui uma propriedade da própria fonte. O nível de potência de som é dada por:

$$L_w = 10 \times \log_{10} \left(\frac{w}{w_r} \right)^2 \text{ dB}$$

em que:

w é a potência do som da fonte, medida em watts,

w_r é a potência do som de referência, correspondente a 10^{-12} watts.

- **Intensidade do som**

O nível de intensidade de som é a quantidade de potência de som por unidade de espaço.

$$I = \frac{w}{4\pi r^2}$$

em que:

w é a potência de som em watts

r é a distância, em metros, da fonte.

- **Análise das frequências**

Tal como um dado ruído é caracterizado pela forma como varia ao longo do tempo, daí ser habitual efectuar-se uma análise das várias frequências, também a energia do ruído espalhada ao longo do espectro das várias frequências audíveis (cerca de 20 Hz – 20 000 Hz) é um factor que ajuda a ser identificado pelo ouvido humano.

4.4 Parâmetros estatísticos de ruído

Os níveis de ruído raramente são constantes porque a variedade de pressões sonoras usualmente são resultado de diferentes fontes de ruído, que variam de intensidade ao longo do tempo.

Desse modo, os níveis de ruído são, usualmente, quantificados num dado intervalo de tempo.

O intervalo de tempo varia de acordo com a natureza do ruído.

- **Nível de pressão sonora contínuo equivalente ($L_{Aeq,T}$)**

Os níveis de ruído variam, no tempo, de modo aleatório daí utilizar-se, para medir o ruído ambiental, o nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}), expresso em dB, que representa a média de energia sonora durante um intervalo de tempo:

$$L_{eq} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

em que, n representa o número de medições e L o nível de pressão sonora.

O nível de som ambiental é usualmente medido em termos de nível pressão sonora contínuo equivalente ($L_{Aeq,T}$).

$L_{Aeq,T}$ é o nível de som, que, se gerado continuamente, fornece a mesma energia num intervalo de tempo T que as flutuações de som medidas.

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \log_{10} \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n 10^{\frac{(L_{Aeq,T})_i}{10}} \right]$$

em que, n representa o número de amostras ao longo do intervalo de referência .

Este indicador é o usado quando se pretendem fazer medições do ruído produzido pelo tráfego rodoviário para cumprir a legislação.

5 Ruído de Tráfego

O ruído de tráfego rodoviário é fruto do som proveniente de veículos motores. O ruído produzido por estes depende de vários factores, nomeadamente:

- tipo de veículo (ligeiro, pesado, motociclo, ...);
- características do motor (cilindrada, potência, ...);
- tipo de condução (velocidade constante, utilização da caixa de velocidades, ...);
- tipo de pneu;
- tipo de piso da via (paralelepípedos, asfalto liso, asfalto rugoso, ...);
- meio de propagação (barreiras acústicas, ...).

Para definir o nível de pressão acústica equivalente (LA_{eq}) no caso de um ou várias fontes seguiu-se Leclercq (2002, páginas 33-34).

5.1 Caso de uma única fonte sonora

Um ponto do espaço recebe um sinal $p(t)$ de uma fonte.

A fim de caracterizar esse sinal de um modo sintético num tempo T , é usada a pressão acústica eficaz $p_{eff,T}^2(t)$, que corresponde à média quadrática da pressão acústica durante um intervalo de tempo T :

$$p_{eff,T}^2(t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} p^2(u) du$$

Segundo o intervalo de integração considerado, a representação do sinal é mais ou menos exacta em termos de amplitude, no entanto é equivalente do ponto de vista da energia. O nível de pressão acústica associado a esta expressão é denominado por nível de pressão acústica equivalente (LA_{eq}) e é definido por:

$$LA_{eq,T}(t) = 10 \log \frac{p_{eff,T}^2(t)}{p_0^2}$$

em que,

$LA_{eq,T}(t)$: nível de pressão acústica equivalente (em energia) num dado intervalo T expresso em decibéis com ponderação A [dB(A)].

p_0 : pressão acústica de referência, correspondente a 2×10^{-5} Pa.

Dois tipos de LA_{eq} podem ser distinguidos de acordo com o período de agregação T: valores de LA_{eq} curtos, em que o T é da ordem das décimas, centésimas ou milésimas de segundo, e os longos, em que T é da ordem de uma hora ou mesmo de vários dias. No primeiro caso, $LA_{eq,T}(t)$ é denominado por nível de pressão acústica $LA_p(t)$.

Infelizmente o sonómetro que se utilizou não tinha a possibilidade de exportar digitalmente a curva $L_A(t)$.

Como o ruído produzido por um veículo fica, essencialmente, definido pelo máximo (Leclercq, 2002, página 36) então a preocupação na recolha de dados foi o de clarificar o máximo.

Os dados foram, amavelmente, recolhidos a nosso pedido pelo Engenheiro António Eduardo Baptista da Costa³.



(a)



(b)

³ Engenheiro do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

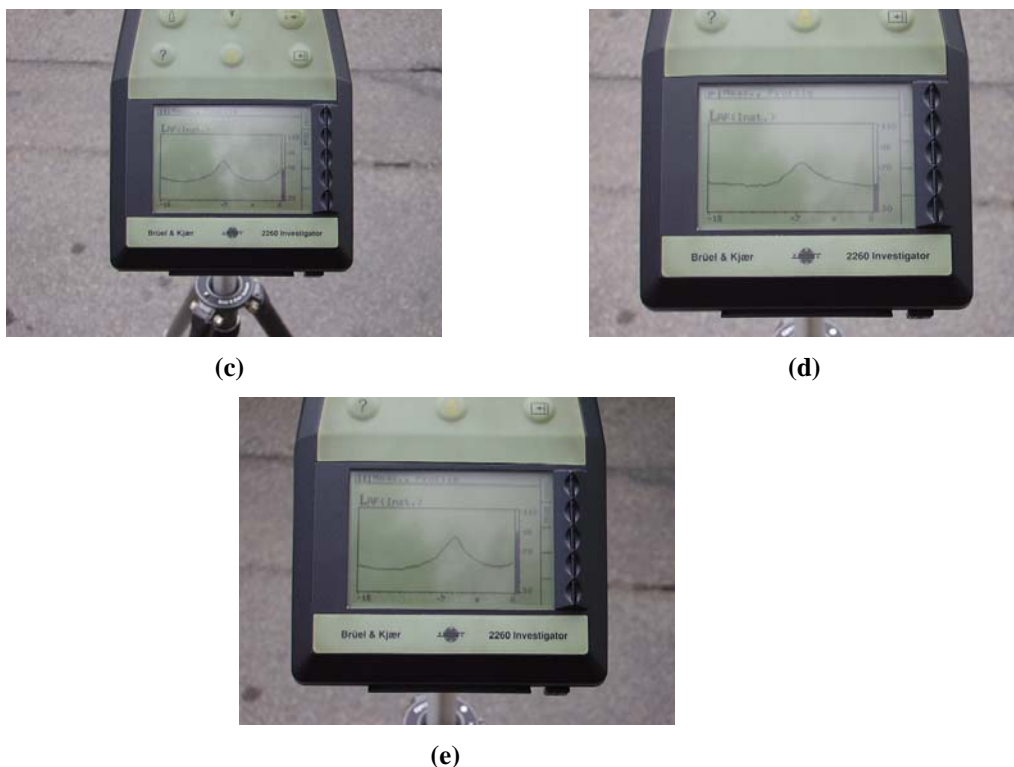


Figura 4 – Exemplos de curvas produzidas pelo ruído de diferentes veículos: (a) veículo ligeiro; (b) veículo ligeiro; (c) moto; (d) autocarro lento e (e) autocarro.

Tabela 1 – Elementos retirados das fotos.

Foto	Tipo de veículo	Nível máximo	Tempo acima do ruído de fundo (segundos)	Nível do ruído de fundo
(a)	Veículo ligeiro	81 dB	10,2	50 dB
(b)	Veículo ligeiro	67 dB	6,9	48 - 50 dB ⁴
(c)	Moto	74 dB	7,9	52 dB
(d)	Autocarro lento	75 dB	7,7	53 dB
(e)	Autocarro	82 dB	9,2	52 dB

Estes valores foram obtidos via papel milimétrico sobre as fotografias uma vez que não há saída digital destes valores no sonómetro.

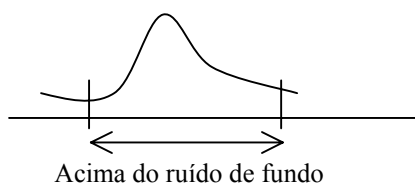


Figura 5 – Esquema do espaço decorrido acima do ruído de fundo.

⁴ Assimetria.

O uso do sonómetro surgiu da dificuldade na obtenção da pressão sonora ao longo do tempo para um veículo isolado. De início apenas se tem um ruído de fundo que com a aproximação do veículo aumenta até atingir o máximo no ponto de distância mínima ao observador, diminuindo de seguida à medida que o veículo se afasta.

Alguns autores atribuem ao efeito de Dopplër⁵ a assimetria, ou seja, decaimento mais lento do que a subida, outros garantem que não.

Esta assimetria do ruído também poderá ser atribuída à assimetria do veículo e à dominância do ruído de escape quando o veículo se afasta, ficando o seu estudo para um trabalho posterior.

Preparou-se a construção do ruído a partir do ruído individual de cada veículo.

Fez-se a devida pesquisa bibliográfica e não se encontrou a fórmula. Encontrou-se poucas vezes a curva correspondente ao ruído individual de um veículo mas sempre sem a respectiva fórmula.

Perante o resultado compreende-se facilmente porque é que poucas vezes é escrita, pois devidamente reinterpretada trata-se de uma distribuição de Cauchy (Apostol, 1969, volume II, página 516). Esta lei não tem momentos apesar da sua simetria sugerir uma média igual a zero, não sendo, por isso, uma variável muito tratável (Patel, 1988).

Desse modo, utilizando os dados conhecidos deduziu-se uma fórmula que permitisse fornecer uma aproximação ao nível de pressão sonora ao longo do tempo para um veículo isolado.

⁵ Fenómeno da variação da altura do som apreciado pelo ouvido, como consequência do movimento relativo da fonte sonora e do observador. Enquanto se dá a aproximação, a frequência vibratória que abala o ouvido do observador é mais elevada e, por isso, o som torna-se mais agudo verificando-se o contrário quando se afasta, a frequência baixa e o som torna-se mais grave.

- **Dedução da variação do nível de ruído de um veículo isolado ao longo do tempo**

Considere-se uma estrada com uma única via, um único veículo a velocidade constante e um observador (fixo).

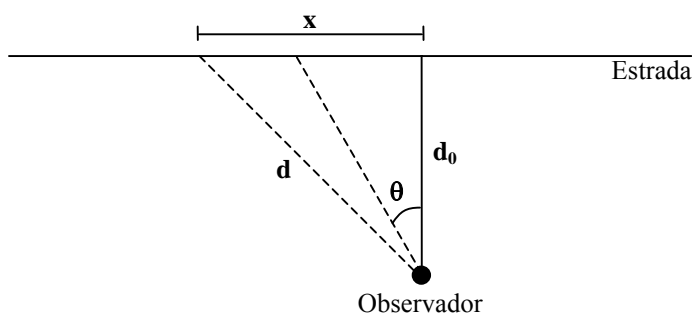
Seja,

$d_0 \rightarrow$ a distância, em metros, do observador ao centro da estrada;

$d \rightarrow$ a distância, em metros, entre o observador e o veículo à medida que este se desloca a uma velocidade constante;

$x \rightarrow$ o espaço, em metros, percorrido pelo veículo a velocidade constante; e,

$\theta \rightarrow$ a amplitude do ângulo formado por d e d_0 em que $\theta \in \left] -\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right[$.



Começou-se por definir o tempo (t) em função de θ .

$$\tan \theta = \frac{x}{d_0} \Leftrightarrow \theta = \arctan\left(\frac{x}{d_0}\right)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{1}{d_0} dx}{1 + \left(\frac{x}{d_0}\right)^2}$$

A curva que representa o nível de pressão acústica de um veículo isolado em andamento pode ser definida por:

$$L_A = 10 \log \frac{A}{1 + Cx^2}$$

em que A e C são constantes.

$$L_A = 10 \log \frac{A}{1 + Cx^2} \Leftrightarrow 10^{\frac{L_A}{10}} = \frac{A}{1 + Cx^2} \Leftrightarrow \frac{1}{10^{\frac{L_A}{10}}} = \frac{1}{A} + \frac{C}{A} x^2$$

Tabela 2 – Nível de pressão acústica segundo o gráfico de Leclercq (2002)

x	x ²	L _A	$\frac{1}{\frac{L_A}{10^{10}}}$
0	0	75	3,16228E-08
1	1	72,5	5,62341E-08
2	4	66	2,51189E-07
3	9	62,5	5,62341E-07
4	16	61	7,94328E-07
5	25	59	1,25893E-06
6	36	57,5	1,77828E-06
7	49	56	2,51189E-06
8	64	55	3,16228E-06

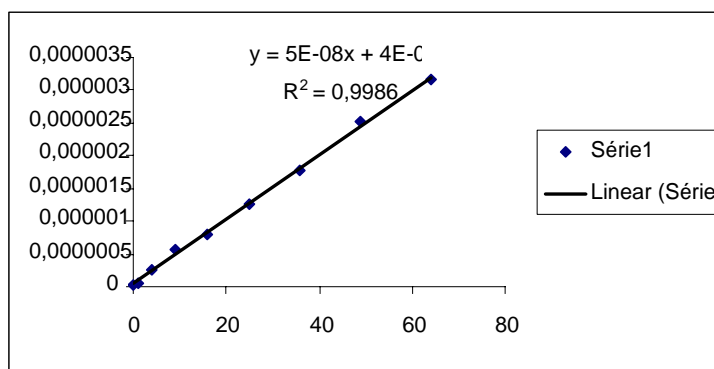


Figura 6 – Representação de $\frac{1}{\frac{L_A}{10^{10}}}$ em função de x^2 e respectiva recta de regressão.

O nível de correlação faz supor que a curva foi obtida analiticamente, mesmo não sendo explicada a fórmula.

De modo a obter-se uma melhor aproximação, determinou-se, analiticamente, a recta de regressão e obteve-se:

$$y = 4,919 \times 10^{-8} + 4,135 \times 10^{-8} x .$$

Donde

$$\begin{aligned} \frac{1}{\frac{L_A}{10^{10}}} &= \frac{1}{A} + \frac{C}{A} x^2 = \\ &= 4,919 \times 10^{-8} + 4,135 \times 10^{-8} x^2 . \end{aligned}$$

Obtém-se,

$$\begin{cases} \frac{1}{A} = 4,919 \times 10^{-8} \\ \frac{C}{A} = 4,135 \times 10^{-8} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} A \approx 20329335,23 \\ C \approx 0,8406 \end{cases}$$

Com os defeitos devidos, considerou-se a seguinte fórmula ajustada ao máximo e ao limite de ruído de fundo (55dB):

$$L_A = 10 \log \frac{20329335,23}{1 + 0,8406 x^2} .$$

Este método descrito passo a passo foi implementado numa folha de Excel, sendo por isso facilmente reproduzido para qualquer outra curva do sonómetro.

5.2 Caso de várias fontes sonoras não correlacionadas

A sobreposição de ruído proveniente de várias fontes num ponto é traduzida pela adição das pressões instantâneas (propriedades de acústica linear). No caso de N fontes não correlacionadas entre si, a pressão eficaz resultante é dada por:

$$p_{\text{eff},T}^2(t) = \sum_{i=1}^N p_{\text{eff},T,i}^2(t)$$

Então o nível de pressão acústica, para N ruídos não correlacionados de níveis $LA_{\text{eq},T,i}(t)$, respectivamente é dado por:

$$LA_{\text{eq},T}(t) = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{\text{eq},T,i}(t)}{10}}$$

No caso do ruído de tráfego, admitiu-se que as fontes de ruído de um veículo (pneus, motor, entre outros) estão agregadas (integradas) e que os ruídos dos diferentes veículos não estão correlacionados.

Difícilmente se podem utilizar estes modelos sem uma calibração prévia relacionada com o país e, eventualmente, alguns elementos experimentais mesmo com as condições do local.

- **Cálculo do ruído produzido por vários veículos, sabendo o individual**

Considere-se os seguintes níveis de pressão acústica 60, 63 e 65 em dB. Se, se pretende determinar o nível de pressão acústica produzido por essas três fontes não correlacionadas, tem que se “somar” esses valores.

Quando se pretende “somar” dB utiliza-se a seguinte fórmula:

$$LA_{\text{eq},T}(t) = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{\text{eq},T,i}(t)}{10}} .$$

Neste caso, em particular, obtém-se

$$LA_{eq,T}(t) = 10 \log \left(10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{63}{10}} + 10^{\frac{65}{10}} \right) \approx 68 \text{ dB}.$$

Após várias simulações obtiveram-se os seguintes gráficos em diferentes condições.

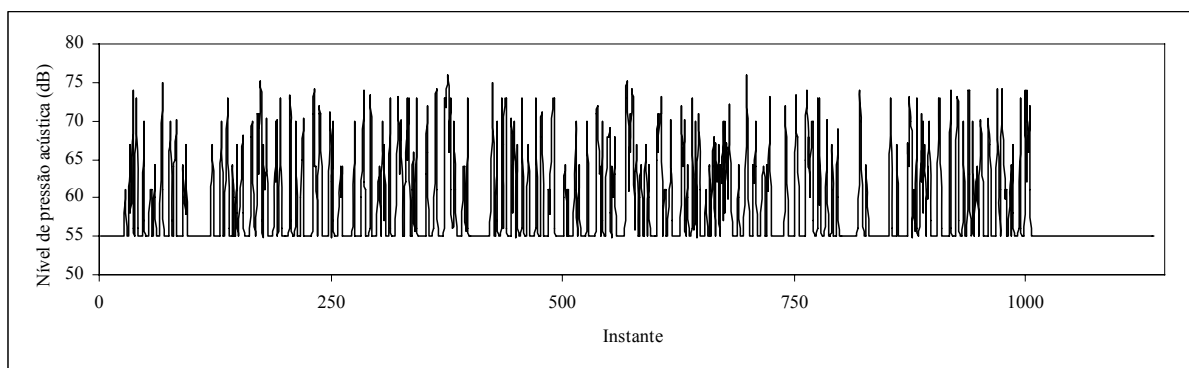


Figura 7 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,3 de 300 veículos, dos quais 32 são veículos pesados.

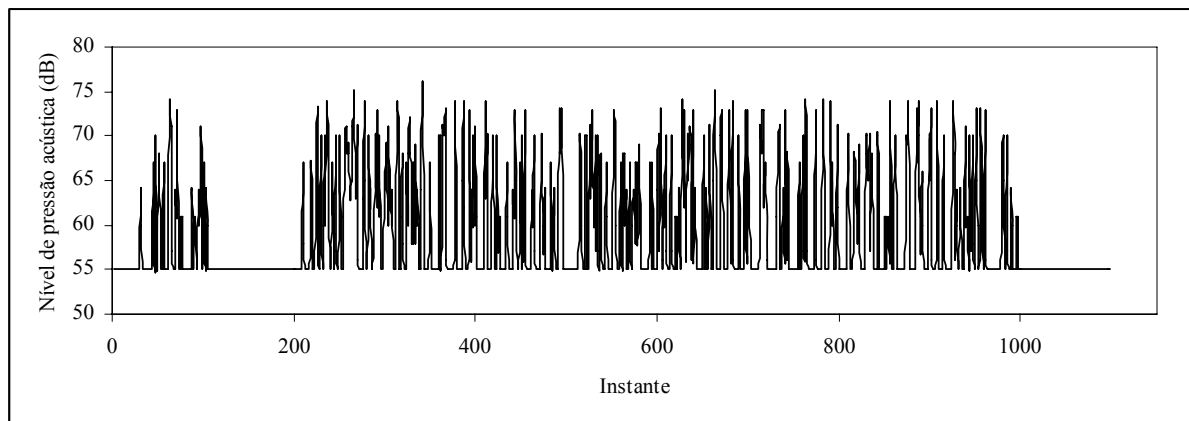


Figura 8 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,3 de 300 veículos, dos quais 25 são veículos pesados. Paragem, 50 posições, antes da medição do nível de pressão acústica durante 100 instantes.

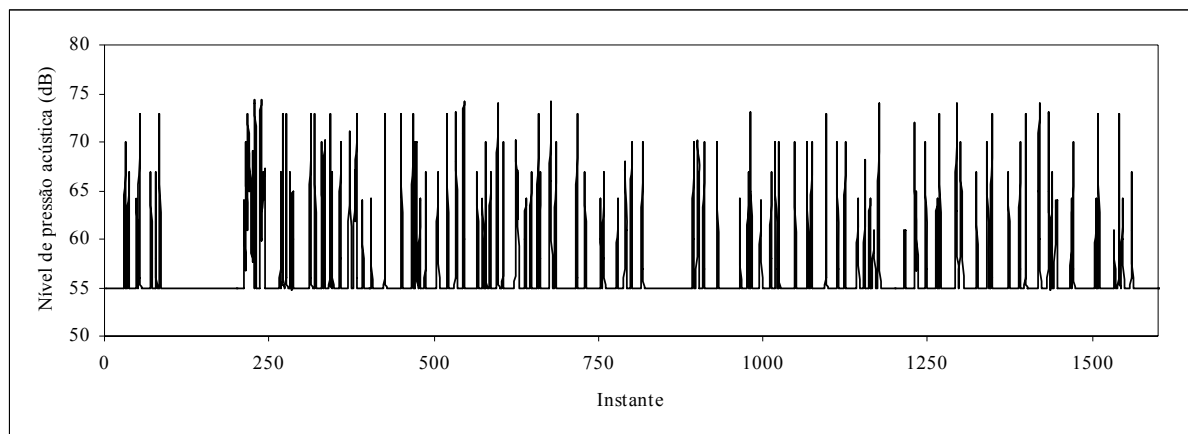


Figura 9 – Nível de pressão acústica para uma intensidade de tráfego de 0,1 de 150 veículos, dos quais 18 são veículos pesados. Paragem, 50 posições, antes da medição do nível de pressão acústica durante 100 instantes.

Neste momento considerou-se os veículos parados com um nível de pressão acústica igual ao ruído de fundo (55 dB). Há muito pouco acordo sobre qual o ruído emitido nestas condições (ver por exemplo, Leclercq, 2002, página 246).

No entanto, o simulador já permite detectar o aumento de ruído no momento em que o obstáculo desaparece com o arranque de todos os veículos quase simultaneamente.

6 O Simulador

Neste trabalho foi desenvolvido um simulador *Tráfego* que pretende simular o tráfego e o respectivo ruído, por ele produzido. Recorreu-se a autómatos celulares para realizar a simulação.

6.1 Descrição do simulador

A simulação é feita numa via, de sentido único, em que não são permitidas ultrapassagens, não existem cruzamentos nem bifurcações, no entanto, foi introduzido um obstáculo e um semáforo que obrigará os veículos reiniciarem a marcha com velocidade nula.

A dimensão do autómato celular é 1, ou seja, a via é dividida em células de igual tamanho “unidas” em linha como mostra a figura 10. Cada célula é caracterizada por um índice (v) e o estado do sistema é caracterizado por um vector.



Figura 10 – Autómato celular de dimensão 1.

A via é representada por uma rede composta por 1000 células, o que na realidade equivale a 8,5 km.

Considerou-se que um veículo deslocando-se a uma velocidade de 15 km/h avança uma célula por unidade de tempo, ou seja, percorria 8,5 metros por unidade de tempo que é de 2,04 segundos.

Um veículo que se deslocasse à velocidade de 60 km/h percorreria 4 células por unidade de tempo e à velocidade de 120 km/h avançaria 8 células por unidade de tempo.

Aos veículos pesados foi atribuída uma velocidade máxima de 6 e aos ligeiros uma velocidade máxima de 8.

Estas velocidades foram consideradas tendo em conta o Código da Estrada, pois este regulamenta que os veículos ligeiros não podem exceder, numa auto-estrada, os 120 km/h e os pesados de mercadorias (sem reboque ou com semi-reboque) 90 km/h.

No entanto é do conhecimento geral que muitas das vezes essas velocidades são ultrapassadas quer sistematicamente quer acidentalmente.

Considerou-se que as velocidades de entrada variavam entre 0 e 8 para os veículos ligeiros e entre 0 e 6 para os veículos pesados.

As velocidades de entrada dos veículos foram aleatórias e a distância de segurança igual para todos os veículos.

As pequenas flutuações aleatórias de velocidade correspondem ao andamento normal de um veículo, maior pressão no acelerador ou mais tempo de pressão no acelerador e são fortemente ampliadas tanto em probabilidade como em amplitude por condições adversas, nomeadamente atmosféricas, tipo de piso, entre outras.

Por exemplo, a existência de um grande número de peões a atravessar desorganizadamente pode provocar diminuições brutais do fluxo de tráfego.

O gerador dos tempos de entrada foi baseado num processo de Poisson com parâmetro λ , que representa o inverso do número médio de veículos por unidade de tempo.

O avanço de um veículo segue o modelo de Nagel e Schreckenberg (NaSch TCA).

6.1.1 Simulador de tráfego

Começou-se por implementar um simulador de tráfego simples, considerando apenas uma faixa de rodagem.

Os veículos possuem em cada instante as características:

- posição (\mathbf{x}) (variável);
- velocidade (\mathbf{v}) (variável).

Estas grandezas definem o estado das células do autómato celular. Um veículo em cada iteração avança o número de células correspondente à velocidade.

Na prática, as células que não têm veículos permanecem desocupadas a cada iteração, a não ser um veículo a alcance, passando o seu estado a ocupado.

O estudo de modelos com muitos objectos em que se estudam as características globais do sistema a partir das características individuais designa-se por Mecânica Estatística.

A robustez dos resultados faz suspeitar que as características individuais têm pouca influência no tráfego, daí o supor-se todos os veículos idênticos.

Neste modelo as trajectórias são todas conhecidas, ao contrário de Leclercq (capítulo 8) que tem de reconstruir trajectórias e eliminar os pesados.

6.1.2 Gerador de tempo de simulação

λ parâmetro da distribuição – inverso do número de veículos por unidade de tempo
(unidade de tempo – segundo)

t tempo até à próxima chegada

a valor aleatório entre 0 e 1 (inclusive)

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln a$$

O tempo em cada iteração está relacionado com o tempo necessário para a entrada de um veículo numa célula.

Num processo de Poisson homogéneo o tempo entre veículos consecutivos é exponencial com taxa constante. Se não for um processo de Poisson homogéneo muitas vezes é suficiente considerar com processo de Poisson com taxa variável no tempo. Assim o gerador permite variações da taxa ao longo do tempo.

O parâmetro da distribuição λ é definido em função do fluxo pretendido para as chegadas dos veículos. O valor é igual ao inverso do número de veículos por unidade de tempo, isto é, uma iteração. Designando por X esta variável, tem-se $E(X) = \frac{1}{\lambda}$.

Seja

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \text{ a função densidade da distribuição exponencial.}$$

Como

$$1 - e^{-\lambda t} \approx U(0,1) \text{ tem-se que } e^{-\lambda t} \approx 1 - U(0,1), \text{ donde } -\lambda t \approx \ln(1 - U(0,1)).$$

$$\text{Logo, } t \approx -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U(0,1)).$$

$$\text{No entanto, como } 1 - U(0,1) \approx U(0,1) \text{ obtém-se } t = -\frac{1}{\lambda} \ln(U(0,1)),$$

ou seja, $t = -\frac{1}{\lambda} \ln a$, em que a é um valor aleatório entre 0 e 1 (inclusive) e $\frac{1}{\lambda}$ é o número de veículos por unidade de tempo.

Como vamos utilizar autómatos celulares vamos ter que discretizar os tempos individuais, no entanto, podia ter-se optado por discretizar os tempos acumulados.

Seja Y a variável X discretizada, fazendo

$$p_0 = P(Y = 0) = P\left(0 < X < \frac{1}{2}\right) \text{ e } p_n = P(Y = n) = P\left(n - \frac{1}{2} < X < n + \frac{1}{2}\right)$$

vem

$$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = \int_0^{0,5} \lambda e^{-\lambda t} dt \\ p_n = \int_{n-0,5}^{n+0,5} \lambda e^{-\lambda t} dt, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{array} \right.$$

$$p_n = \int_{n-0,5}^{n+0,5} \lambda e^{-\lambda t} dt = \left[-e^{-\lambda t} \right]_{n-0,5}^{n+0,5} = -e^{-\lambda(n+0,5)} + e^{-\lambda(n-0,5)} = e^{-\lambda n} (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) = 2e^{\lambda n} \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

$$p_0 = \int_0^{0,5} \lambda e^{-\lambda t} dt = \left[-e^{-\lambda t} \right]_0^{0,5} = -e^{-\lambda(0,5)} + e^{-\lambda(0)} = -e^{-0,5\lambda} + 1 = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}}$$

$$\begin{cases} p_0 = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}} \\ p_n = 2e^{\lambda n} \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda}{2}\right), \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{cases}$$

Trata-se de uma função distribuição pois

$$\sum_{x=0}^{+\infty} p_x = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}} + \sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x} (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}} + (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) \sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x}.$$

Como $\sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x}$ é uma progressão geométrica de razão $e^{-\lambda}$ então,

$$\sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x} = e^{-\lambda} \times \frac{1 - e^{-\lambda x}}{1 - e^{-\lambda}} = \frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}}$$

donde

$$\begin{aligned} 1 - e^{-0,5\lambda} + (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) \sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x} &= 1 - e^{-0,5\lambda} + (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) \left(\frac{e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right) = \\ &= 1 - e^{-0,5\lambda} + \left(\frac{e^{-0,5\lambda} - e^{-1,5\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right) = \frac{1 - e^{-0,5\lambda} - e^{-\lambda} + e^{-1,5\lambda} + e^{-0,5\lambda} - e^{-1,5\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} = \\ &= \frac{1 - e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} = 1, \text{ pois } \lambda \neq 0. \end{aligned}$$

Efectuando os cálculos obtém-se: $E(Y) = \frac{1}{\lambda} + O(\lambda^3)$.

A discretização não permite que se coloquem dois veículos na mesma célula. Então quando o tempo gerado for zero passa a ser um, espaçando os veículos consecutivos. Designando por T_a variável efectivamente usada vem:

$$P(T = n) = q_n$$

$$q_n = p_n \text{ se } n = 2, 3, 4, 5, \dots$$

$$q_1 = p_1 + p_0$$

$$\begin{cases} q_1 = 1 - e^{-\frac{3\lambda}{2}} \\ p_n = 2e^{\lambda n} \operatorname{sh}\left(\frac{\lambda}{2}\right), \quad n = 2, 3, 4, 5, \dots \end{cases}$$

Trata-se de uma função distribuição pois

$$\sum_{x=1}^{+\infty} q_x = 1 - e^{-1,5\lambda} + \sum_{x=2}^{+\infty} e^{-\lambda x} (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) = 1 - e^{-1,5\lambda} + (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) \sum_{x=1}^{+\infty} e^{-\lambda x} =$$

$$= 1 - e^{-1,5\lambda} + (e^{0,5\lambda} - e^{-0,5\lambda}) \left(\frac{e^{-2\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right) = 1 - e^{-1,5\lambda} + \left(\frac{e^{-1,5\lambda} - e^{-2,5\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} \right) =$$

$$= \frac{1 - e^{-1,5\lambda} - e^{-\lambda} + e^{-2,5\lambda} + e^{-1,5\lambda} - e^{-2,5\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} =$$

$$\frac{1 - e^{-\lambda}}{1 - e^{-\lambda}} = 1, \text{ pois } \lambda \neq 0.$$

$$E(T) = E(Y) + p_0(1-0) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{2}} + \frac{1}{\lambda} + O(\lambda^3).$$

É este o erro de discretização.

O gerador de números aleatórios foi devidamente testado através das leis derivadas que aparecem neste trabalho.

Não foram detectados enviesamentos sistemáticos nem flutuações aberrantes.

6.1.3 Movimento do veículo

Em cada instante o veículo só avança se cumpridas as seguintes regras:

- acelera uma unidade;
- verifica a distância ao veículo da frente, caso a velocidade que leva for superior à distância, reduz a velocidade para evitar a colisão;
- parâmetro de instabilidade, dada uma probabilidade p , que poderá ser definida pelo utilizador, o veículo mantém a velocidade que leva ou então abranda uma unidade;
- nenhum veículo leva velocidade negativa nem ultrapassa a velocidade máxima.

Na figura 11 encontra-se um esquema que representa o movimento do veículo em dois instantes consecutivos, cumprindo as regras referidas.

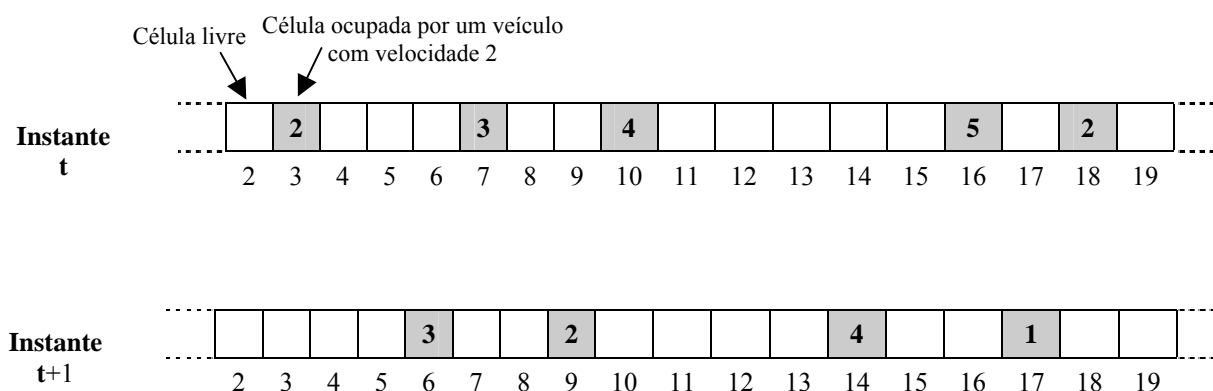


Figura 11 – Exemplo de uma iteração.

Considere-se:

x – posição do veículo

v – velocidade do veículo

v_{\max} – velocidade máxima

d – distância ao veículo da frente

a – valor aleatório entre 0 e 1

p – probabilidade de diminuir a velocidade numa unidade

A regra do autómato celular que permite simular o movimento de um veículo é dada por:

$$v = v + 1$$

$$\text{se } v \geq d \text{ então } v = d$$

$$\text{se } a < p \text{ então } v = v - 1$$

$$\text{se } v < 0 \text{ então } v = 0$$

$$\text{se } v \geq v_{\max} \text{ então } v = v_{\max}$$

$$x = x + v$$

6.2 O simulador

O simulador foi construído de raiz. A *interface* gráfica do simulador foi preparada para facilitar a sua utilização, alertando o utilizador sempre que este a usar incorrectamente.

O programa foi construído por módulos, só se implementou a funcionalidade seguinte depois de testada a anterior.

Inicialmente, apenas veículos ligeiros, depois acrescentaram-se veículos pesados, até à introdução de paragens e do ruído.

O programa inicia-se com a construção do tráfego, podendo o utilizador definir:

- a intensidade de tráfego;
- o número de veículos;
- a velocidade inicial de todos os veículos, que poderá ser zero ou aleatória;
- a proporção de pesados;
- o tipo do primeiro veículo, ligeiro ou pesado;
- a probabilidade de um veículo abrandar (parâmetro de instabilidade);
- o tempo de simulação;

- a existência de paragens obstáculo e / ou “semáforo”;
- o ponto de distância mínima ao observador para registo do nível de pressão acústica.

A implementação computacional, em *Microsoft Visual Basic 6.0*, deste modelo encontra-se no Anexo A.

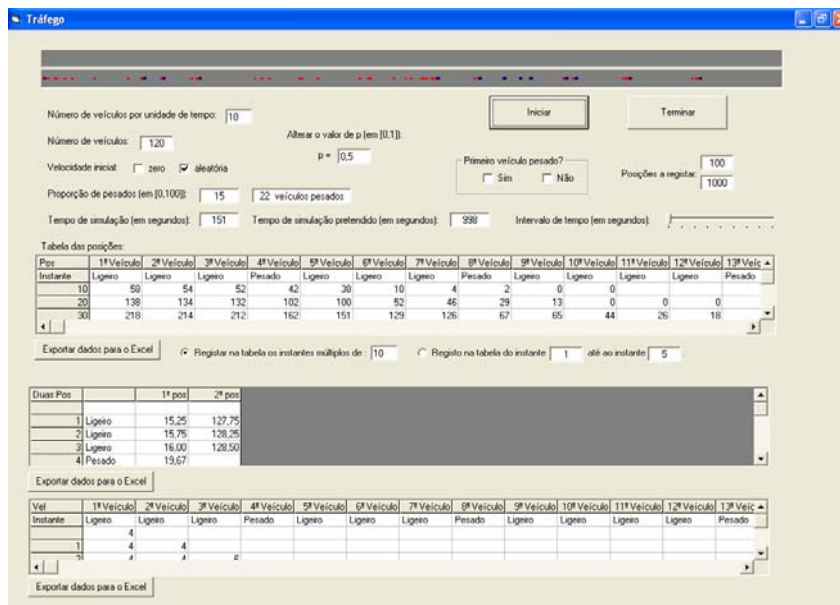


Figura 12 – Exemplo de uma Interface (inicial) do programa Tráfego.

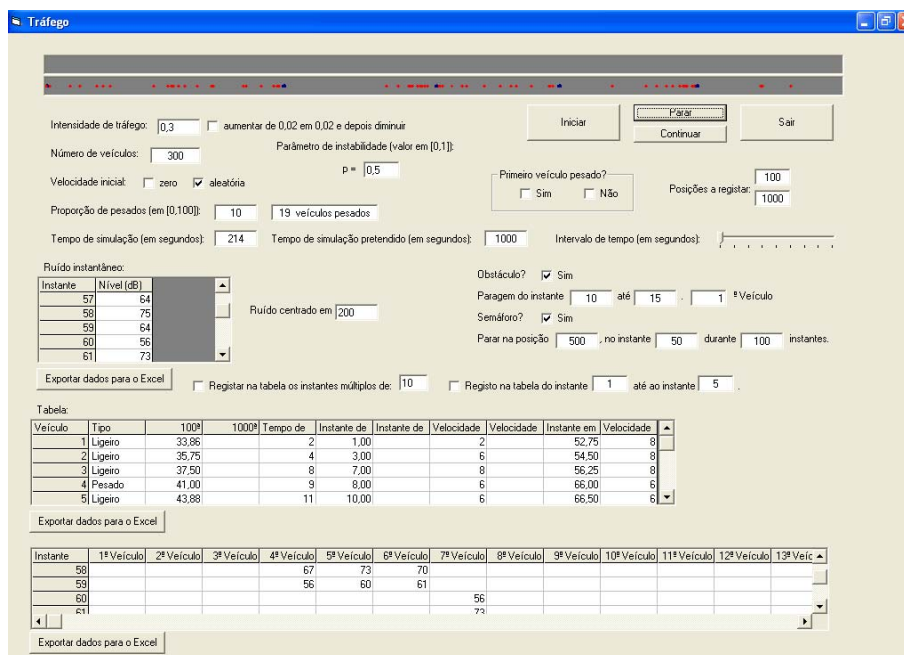


Figura 13 – Exemplo de uma Interface (actual) do programa Tráfego.

A cada veículo (v) que entra na via é-lhe associado as seguintes características:

tem_veículo (v) – tempo de entrada do veículo no sistema;

tipo_veículo (v) – tipo de veículo (0 – pesado; 1 – ligeiro);

pos_veículo (v) – posição do veículo (em cada instante de tempo);

vel_veículo (v) – velocidade do veículo (em cada instante de tempo).

O modelo funciona de acordo com os seguintes parâmetros:

n – número total de veículos (ligeiros e pesados);

pp – proporção de pesados;

λ – intensidade tráfego;

p – probabilidade do veículo abrandar (parâmetro de instabilidade).

Como já referido anteriormente os veículos ligeiros não ultrapassam a velocidade 8 e os pesados a velocidade 6.

Cada célula só pode encontrar-se num dos seguintes estados, livre ou ocupada. Num dado instante de tempo, uma célula só pode ser ocupada por um único veículo, no instante seguinte poderá estar livre ou ocupada pelo mesmo veículo ou por outro.

A simulação termina quando o último veículo passa a posição 1000 desde que não limitado o tempo de simulação.

No final obtém-se, por um lado um filme animado do tráfego (veículo azul – pesado; veículo vermelho – ligeiro) e, por outro, tabelas com alguns registos que poderão ser exportados para Excel.

Este programa possui características do tráfego que se podem modificar como a intensidade de tráfego, proporção de pesados, entre outras, já referidas anteriormente. Permite também a inclusão de alguns tipos de paragens. Neste programa colocou-se a intensidade de tráfego a aumentar no início da simulação e a diminuir no fim, simulando uma ponta na intensidade de tráfego.

Para efeitos de estudo é possível activar / inactivar partes do programa bem como exportar diversas tabelas para folhas de cálculo (Excel).

O código do programa é facilmente alterado / reestruturado para integrar novas variantes, foi o que aconteceu quando se implementaram paragens: um obstáculo e um “semáforo”.

6.3 Limitações do simulador

O programa trata apenas dois tipos de veículos, numa via de sentido único, em que não são permitidas ultrapassagens e não existem cruzamentos nem bifurcações.

O gerador dos tempos de entrada foi baseado num processo de Poisson com parâmetro λ , que representa o número médio de veículos por unidade de tempo.

Quando se consideraram valores de λ superiores a 10 verificou-se que o programa bloqueava, esta situação acontecia porque os tempos gerados eram nulos o que não permitia a entrada dos veículos na via. Realizou-se, então, a seguinte alteração, sempre que o tempo gerado fosse nulo este seria alterado para um. Esta alteração faz com que não hajam limitações para o valor de λ (positivo), no entanto, sugere-se que não se usem valores muito elevados, pois provocam distorções.

O programa pode ser optimizado no entanto foi mantido assim de modo a ser mais legível. É de referir que as simulações são curtas desse modo não foi necessário acelerá-lo.

6.4 Conclusões

Com este programa podem ser verificadas algumas oscilações nas velocidades dos veículos, essas flutuações surgem quando se considera a probabilidade de um veículo abrandar muito próxima de um. Essas flutuações podem dever-se a condições atmosféricas, nomeadamente fraca visibilidade provocada por chuva forte, nevoeiro, fumo, tipo de piso, entre outros.

Mas as flutuações nas velocidades podem também ser provocadas por um veículo, ligeiro ou pesado, mais lento ou então por um elevado número de veículos pesados na via.

7 Explorações e testes ao simulador de tráfego

7.1 Comparações com os resultados de Calheiros, Faria e Rodrigues

Tentou-se recuperar os resultados de Susana Faria (1998), apesar das diferenças entre os modelos.

Susana Faria (1998) considerou para a velocidade de entrada dos veículos, as representadas na tabela:

Tabela 3 – Correspondência entre velocidade em número de células e velocidade em km/h de Susana Faria.

Velocidade (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade (km/h)	Função de probabilidade
4	40	$P(x = 4) = \frac{1}{22}$
5	50	$P(x = 5) = \frac{1}{22}$
6	60	$P(x = 6) = \frac{1}{22}$
7	70	$P(x = 7) = \frac{1}{22}$
8	80	$P(x = 8) = \frac{1}{22}$
9	90	$P(x = 9) = \frac{1}{11}$
10	100	$P(x = 10) = \frac{3}{22}$
11	110	$P(x = 11) = \frac{3}{22}$
12	120	$P(x = 12) = \frac{3}{22}$
13	130	$P(x = 13) = \frac{3}{22}$
14	140	$P(x = 14) = \frac{1}{11}$
15	150	$P(x = 15) = \frac{1}{22}$

Neste modelo considerou-se:

Tabela 4 – Correspondência entre velocidade em número de células e velocidade em km/h.

Velocidade (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade (km/h)
0	0
1	15
2	30
3	45
4	60
5	75
6	90
7	105
8	120

Em relação à unidade de tempo Susana Faria (1998) considerou 1,8 segundos, pois o tamanho de uma célula era 5 metros, neste trabalho considerou-se 2,04 segundos para unidade tempo e 8,5 metros para o tamanho de uma célula.

7.1.1 Veículos ligeiros

Começou-se por tratar apenas o tráfego de veículos ligeiros, neste caso e com base no trabalho de Susana Faria (1998), utilizaram-se para λ os seguintes valores: 0,4533; 0,2267; 0,1133; 0,0567; 0,0283; 0,0142.

No seu trabalho Susana Faria utilizou diferentes valores de λ , no entanto, como a unidade de tempo não é a mesma houve a necessidade de corrigir esses valores, sendo equivalentes.

Considerou-se 0,5 para a probabilidade de um veículo abrandar, podendo ter ou não um veículo à sua frente. No trabalho de Susana Faria (1998) não há referência a essa probabilidade.

Após várias simulações obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 5 – Distribuições estatísticas de várias intensidades de tráfego.

Intensidade de tráfego (n.º de veículos por unidade de tempo)	Velocidade média (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)	Desvio – padrão	Coefficiente de assimetria	Coefficiente de “achatamento”
0,4533	7,5953	113,9295	0,1509	0,7625	- 0,9498
0,2267	7,8005	117,0075	0,1625	0,9408	1,4697
0,1133	7,8343	117,5145	0,1682	1,0549	0,7972
0,0567	7,8601	117,9015	0,1381	0,8253	- 0,1352
0,0283	7,8600	117,9	0,1461	0,9480	0,2406
0,0142	7,8380	117,57	0,1788	1,0794	0,2801

A média das velocidades em cada instante aumenta, ligeiramente, enquanto que a intensidade de tráfego diminui. No entanto não se revelam muito diferentes.

Para a distribuição dos tempos de chegada entre dois veículos consecutivos obteve-se:

Tabela 6 – Distribuição dos tempos de chegadas para diferentes intensidades de tráfego.

Intensidade de tráfego (n.º de veículos por unidade de tempo)	Tempo médio entre entradas (segundos)	Desvio – padrão	Coefficiente de assimetria	Coefficiente de “achatamento”
0,4533	2,825	2,8944	- 3,8323	22,3543
0,2267	4,3333	4,3231	- 2,9038	11,4921
0,1133	9,075	8,8583	- 1,8710	4,6204
0,0567	16,0333	16,1022	- 2,4267	7,9604
0,0283	29,8083	24,3257	- 1,3277	1,7545
0,0142	73,6083	70,8900	- 1,7330	4,1325

À medida que a intensidade de tráfego diminui a média dos tempos de entrada entre dois veículos consecutivos aumenta.

7.1.2 Veículos ligeiros e pesados

Foram introduzidos os veículos pesados e novamente utilizou-se o trabalho de Susana Faria (1998) para a intensidade de tráfego e proporção de pesados. Neste caso também se considerou 0,5 para a probabilidade de um veículo abrandar.

Utilizaram-se as seguintes intensidades de tráfego: 0,4533; 0,2267; 0,1133; 0,0567; 0,0283; 0,0142 e as seguintes proporções de veículos pesados: 5; 10; 20; 30 e 40.

Susana Faria (1998) no seu trabalho fixou a velocidade de entrada dos veículos pesados, os dois gráficos seguintes, reconstruídos através dos seus dados usando unidades naturais (km/h), representam a velocidade média dos ligeiros versus intensidade de tráfego versus percentagem de pesados.

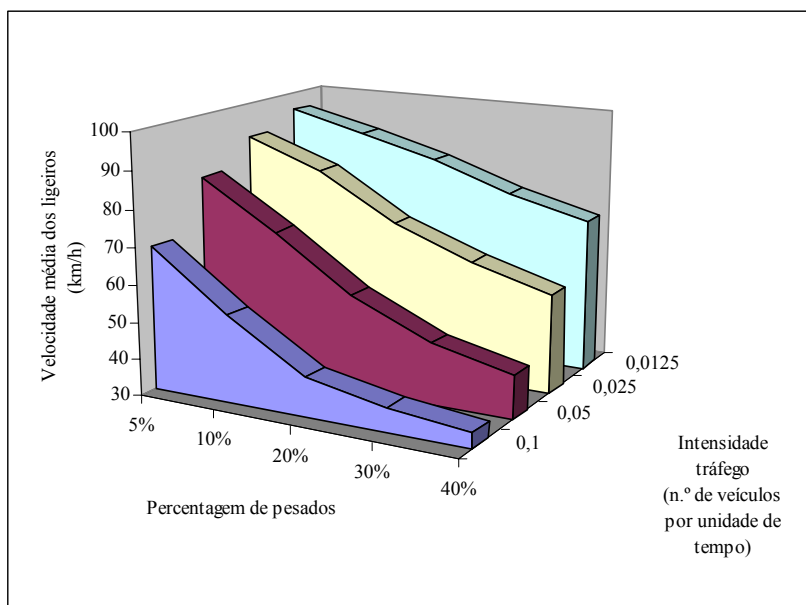


Figura 14 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego para uma velocidade de entrada dos pesados de 30 km/h. Reconstruído usando os resultados de Faria (1998).

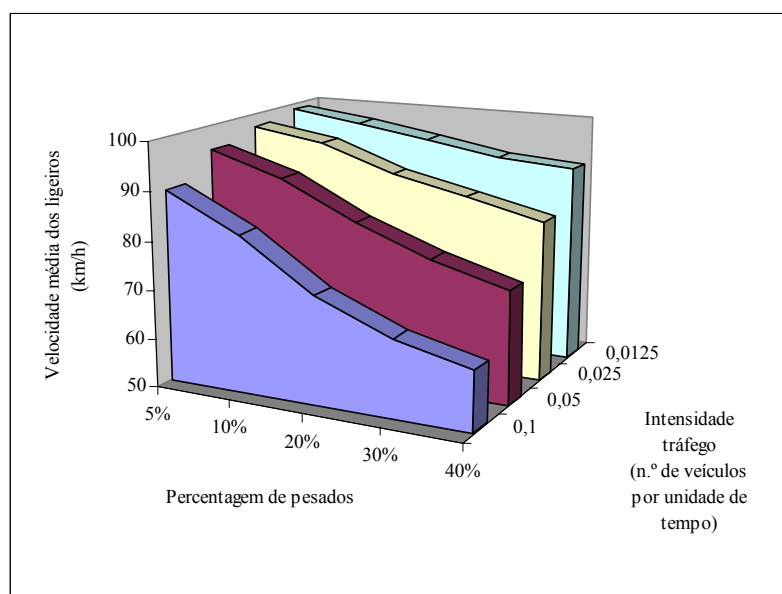


Figura 15 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego para uma velocidade de entrada dos pesados de 50 km/h. Reconstruído usando os resultados de Faria (1998).

O gráfico mostra que a presença de um grande número de veículos pesados faz com que a velocidade média dos ligeiros diminua. Essa diminuição é maior quando a intensidade de tráfego aumenta.

Neste trabalho não se fixou a velocidade de entrada dos veículos pesados no entanto, obteve-se o seguinte gráfico que ilustram os dados obtidos das simulações (ver anexo B).

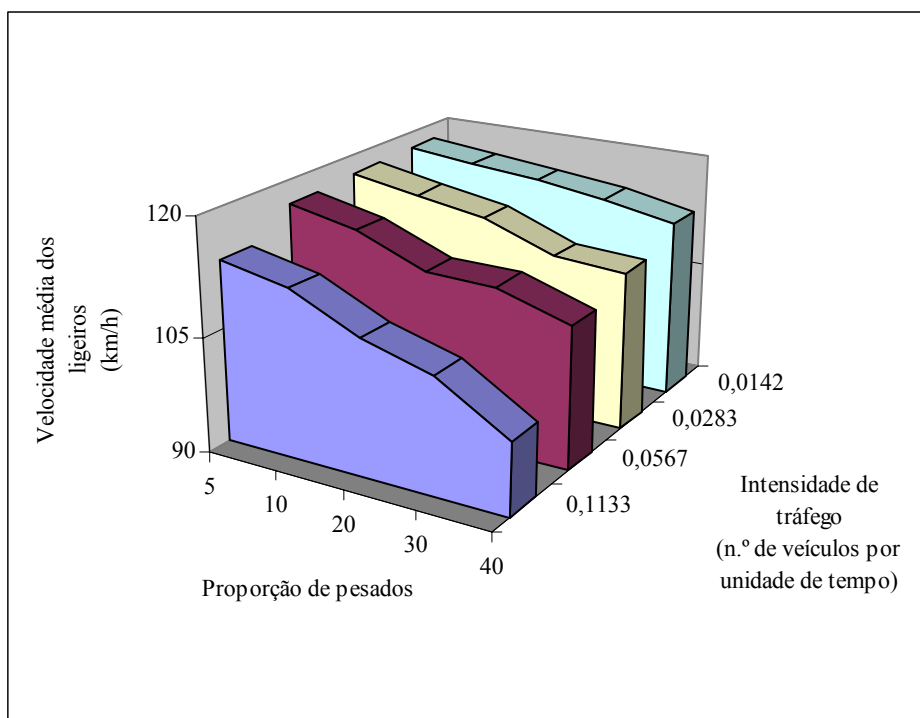


Figura 16 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a percentagem de veículos pesados e a intensidade de tráfego.

Comparando este gráfico com os anteriores podem-se retirar as mesmas conclusões, isto é, à medida que aumenta a proporção de pesados, diminui a velocidade média dos ligeiros, o mesmo se passa quando se aumenta a intensidade de tráfego.

Neste caso as diferenças entre as velocidades médias dos ligeiros são menos acentuadas do que nos dois primeiros gráficos, no entanto, mesmo nesses dois gráficos as diferenças são menos acentuadas no segundo gráfico, pois a velocidade de entrada é superior.

Para cada valor da intensidade de tráfego à medida que aumenta a percentagem de veículos pesados diminui a velocidade média. As velocidades médias são elevadas pois todos os veículos tendem a atingir a velocidade máxima desde que haja espaço à sua frente.

Realizaram-se outras simulações, agora para maiores proporções de veículos pesados (ver anexo B) e construiu-se um gráfico 3D idêntico aos anteriores que representa a velocidade média dos ligeiros versus intensidade de tráfego versus percentagem de pesados.

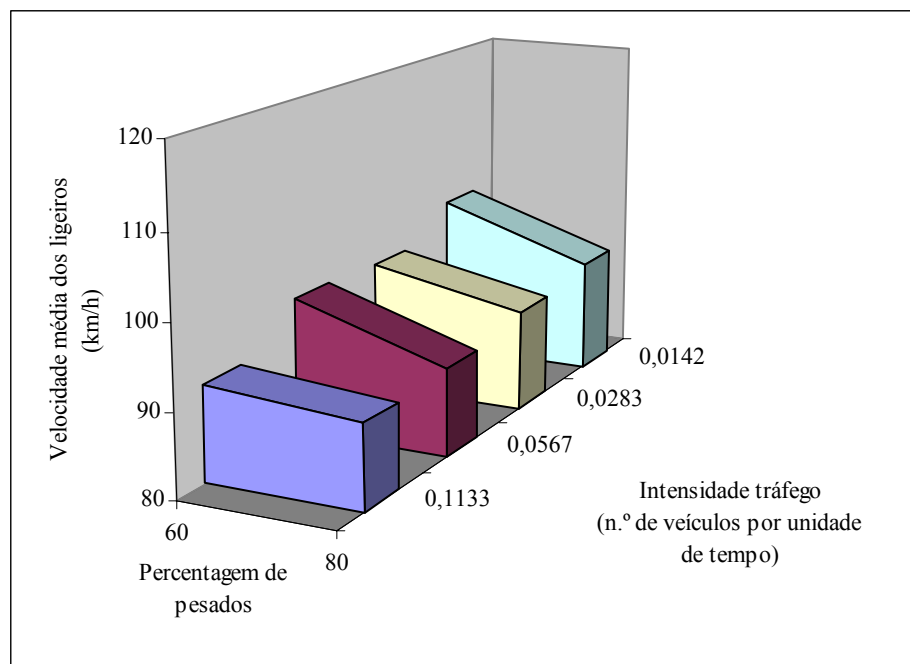


Figura 17 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com elevadas percentagens de veículos pesados e a intensidade de tráfego.

A velocidade média dos veículos ligeiros para percentagens de pesados superiores a 50 % tende para a velocidade máxima dos pesados. Note-se que à medida que a intensidade de tráfego diminui a velocidade máxima aumenta, porque o tráfego está menos denso.

Quando existe um grande número de pesados numa via, a velocidade média dos ligeiros tende para a velocidade máxima dos pesados.

Foram realizadas algumas simulações para verificar que variações poderiam haver no tráfego caso se alterasse a probabilidade de um veículo abrandar mesmo com espaço para acelerar até atingir a velocidade máxima.

Consideraram-se duas proporções de pesados, 10 e 30, e 0,1133 para a intensidade de tráfego.

Quanto ao valor da probabilidade, considerou-se 0,1; 0,25; 0,75; 0,8; 0,85 e 0,9 e obteve-se o seguinte gráfico que ilustra os resultados obtidos (ver anexo B).

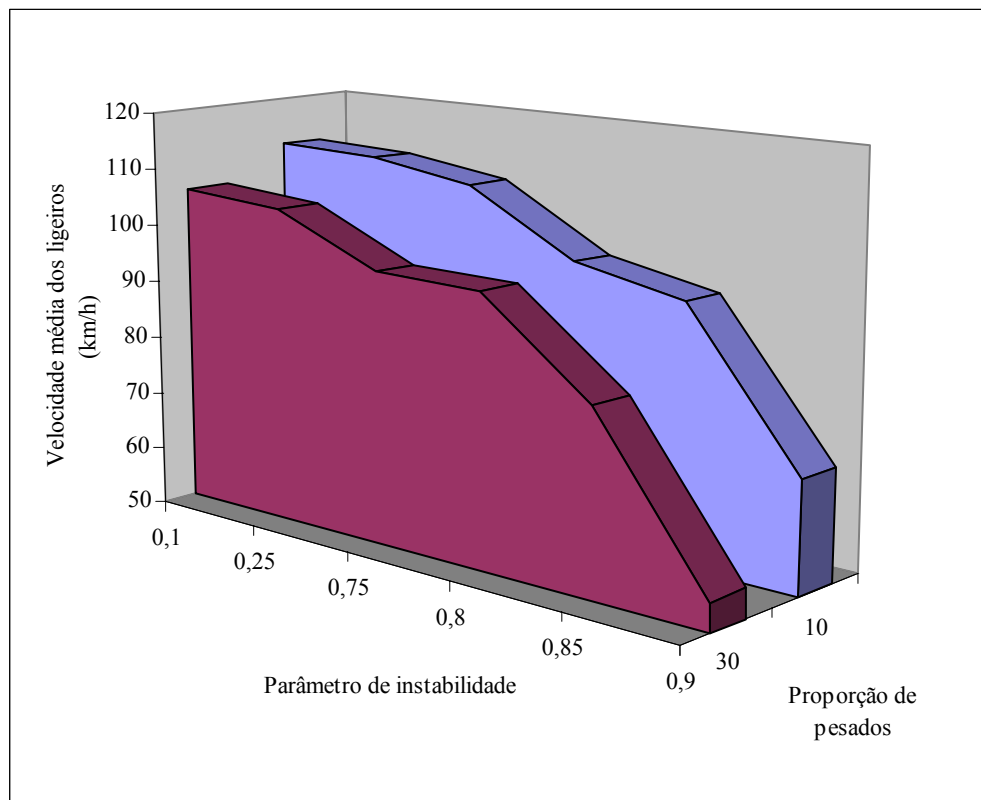


Figura 18 – Gráfico 3D que compara a velocidade média dos ligeiros (km/h) com a proporção de veículos pesados e o parâmetro de instabilidade para uma intensidade de tráfego de 0,1133.

Optou-se pela inversão da proporção de pesados para se ter uma melhor visualização.

À medida que a probabilidade de um veículo abrandar aumenta diminui a velocidade média dos veículos ligeiros.

A combinação de uma grande proporção de pesados com um valor de probabilidade elevado da oscilação de velocidades causa séria diminuição da velocidade média dos ligeiros.

O tráfego oscila entre duas fases instáveis: fase de fluxo livre e fase de fluxo congestionado (Calheiros, F. et al, 1998).

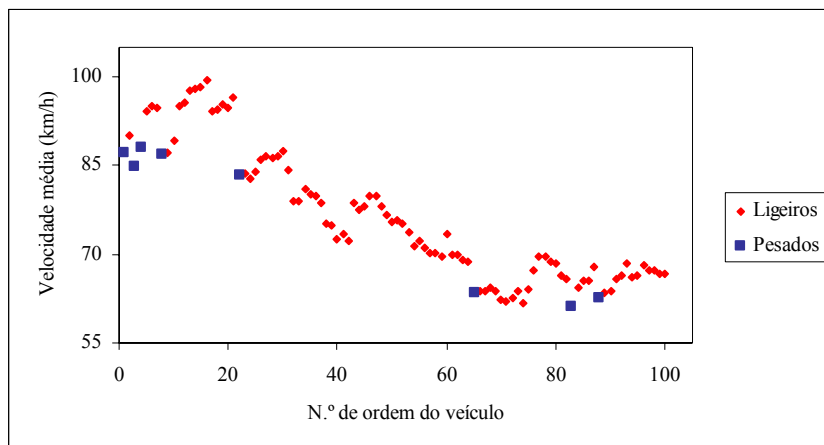


Figura 19 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo.

Neste gráfico observa-se que os veículos pesados incomodam os veículos ligeiros porque quando se verifica a entrada de um veículo pesado este é seguido por vários veículos ligeiros.

Observa-se, também, que o escoamento do tráfego se faz perturbado em pelotões, confirmando, assim, a existência das duas fases do tráfego.

A caracterização de pelotões está relacionada com a não uniformidade de tráfego, isto é, existência de zonas com muita concentração e com pouca concentração de tráfego, que podem aparecer espontaneamente.

Uma das formas de definir pelotão é pelo declive entre pontos consecutivos no gráfico no momento de passagem do número de ordem do veículo.

Quando o declive é baixo estamos no interior do pelotão e quando é alto estamos entre os pelotões (Calheiros, Faria e Rodrigues, 1998).

Sempre que se verifica a entrada de um veículo pesado nota-se uma descida na velocidade média do trajecto.

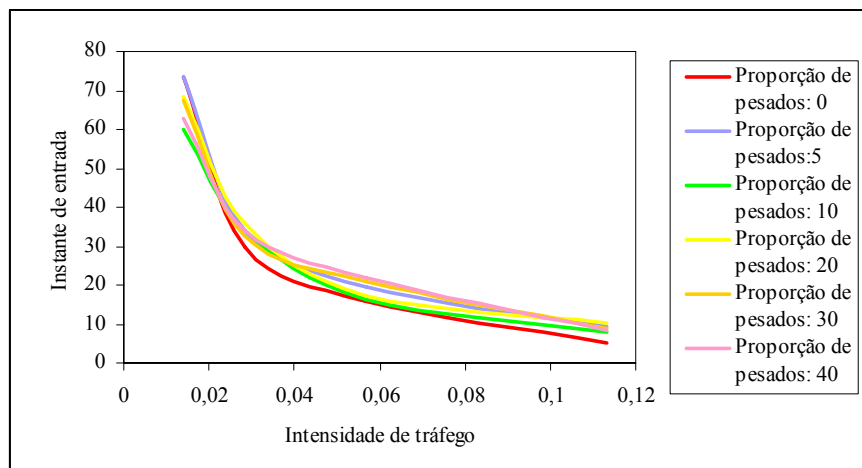


Figura 20 – Média dos instantes de entrada entre veículos consecutivos.

Como se vê a proporção de pesados não tem quase interferência porque apesar de mais lentos não bloqueiam a entrada. Porém os intervalos entre entradas de veículos consecutivos ficam distorcidas quando a intensidade de tráfego é grande por causa da discretização.

7.2 Comparação com o tráfego numa auto-estrada parisiense

Em sistemas complexos com coexistência de fases, são usuais as misturas de distribuições estatísticas com diferentes proporções (Calheiros, 2002).

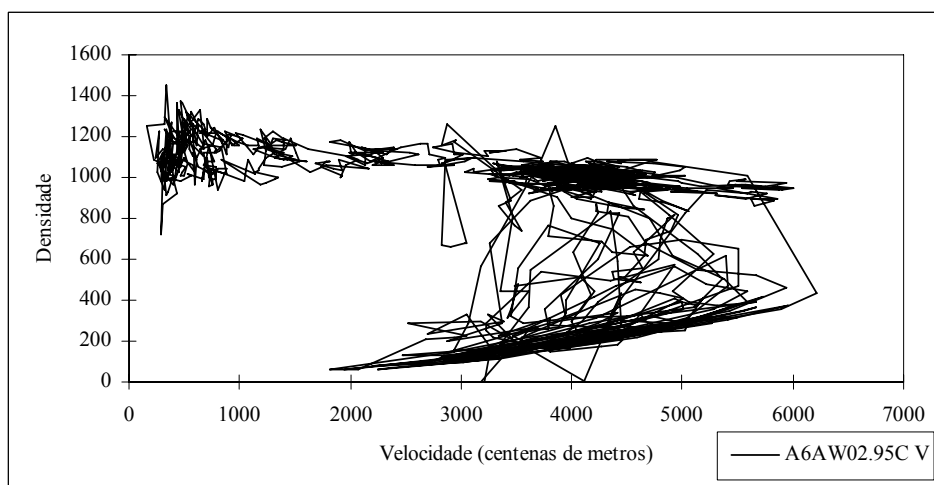


Figura 21 – Densidade de Tráfego em função da Velocidade. Boulevard Périphérique - PARIS, 11 e 12 de Maio de 1997

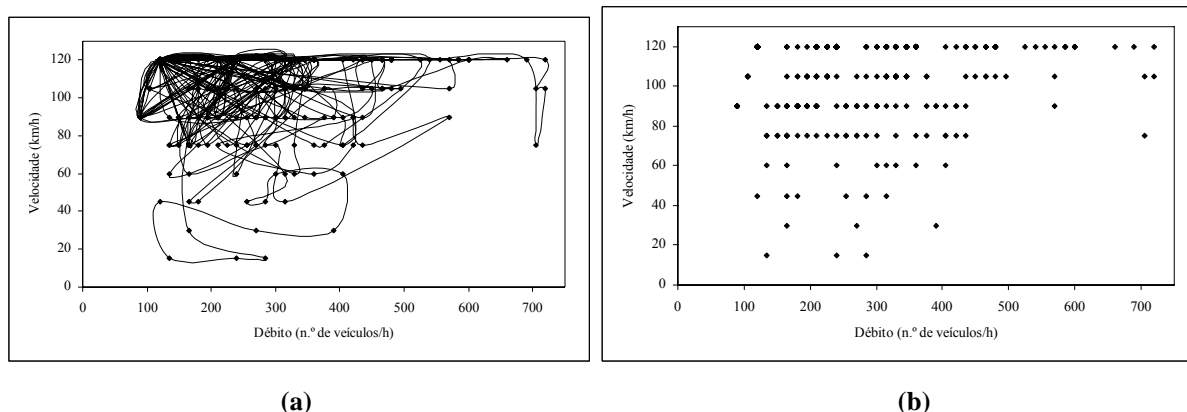


Figura 22 – Em (a) e (b) está representada a velocidade (km/h) em função do débito (n.º de veículos/h), em (a) pontos ligados e em (b) pontos isolados.

O gráfico da velocidade em função do débito apenas com pontos não permite entender a dinâmica, no entanto quando estes são ligados consegue-se entender a dinâmica.

Nesta situação o tráfego passa de fluido e rápido para lento.

No caso real, de Paris, o tráfego passa de rápido e denso para lento.

Um método para se analisar um grande número de dados é reparti-los em pequenos grupos. Nos gráficos abaixo são considerados dois tipos de grupos, o caso real de Boulevard Periphérique – Paris em subamostras de 100 e o caso simulado em subamostras de 30.

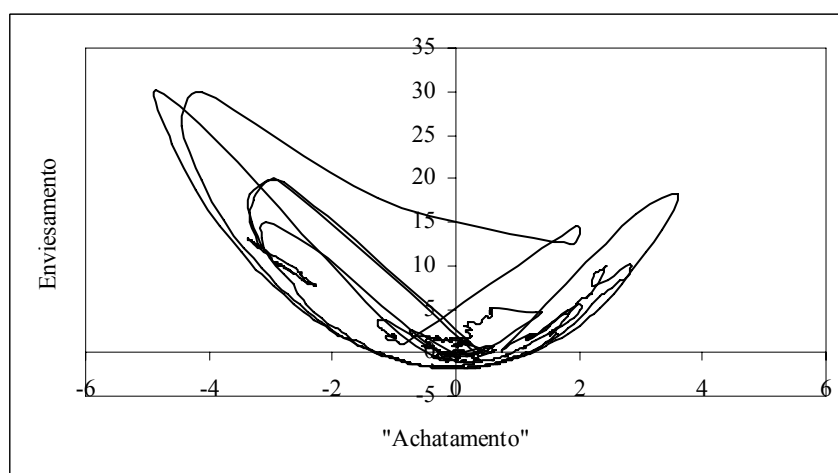


Figura 23 – Enviesamento em função do "Achatamento" para subamostras de 100 veículos

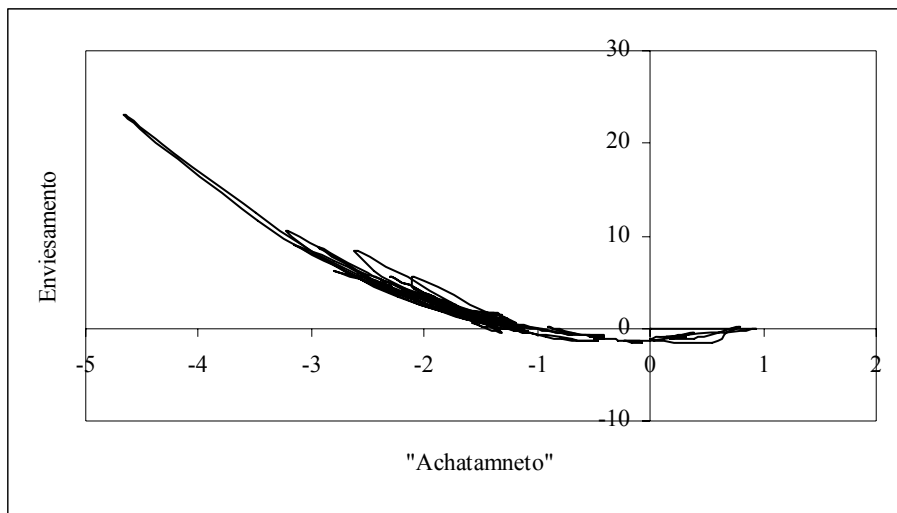


Figura 24 – Enviesamento em função do “Achatamento” para subamostras de 30 veículos.

A relação entre o desvio-padrão e a média é uma circunferência. A distribuição é independente, dependendo apenas da média e do desvio-padrão das suas componentes (Calheiros, 2002).

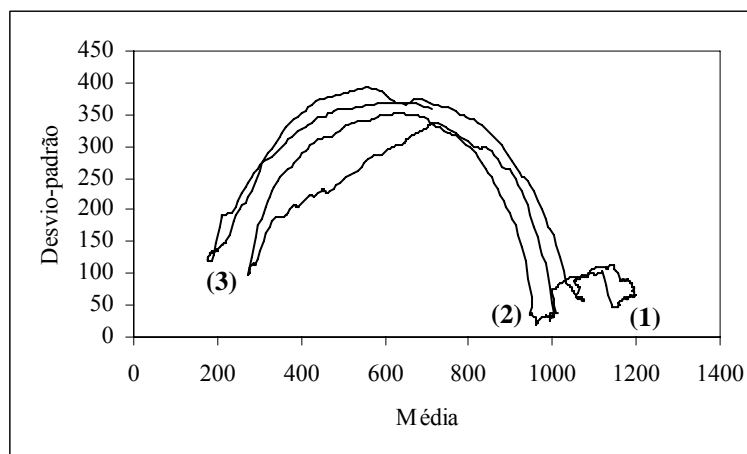


Figura 25 – Desvio-padrão em função da Média. PARIS subamostras de 100 veículos. (1) – Tráfego rápido e pouco denso. (2) – Tráfego rápido e denso. (3) – Tráfego lento e congestionado.

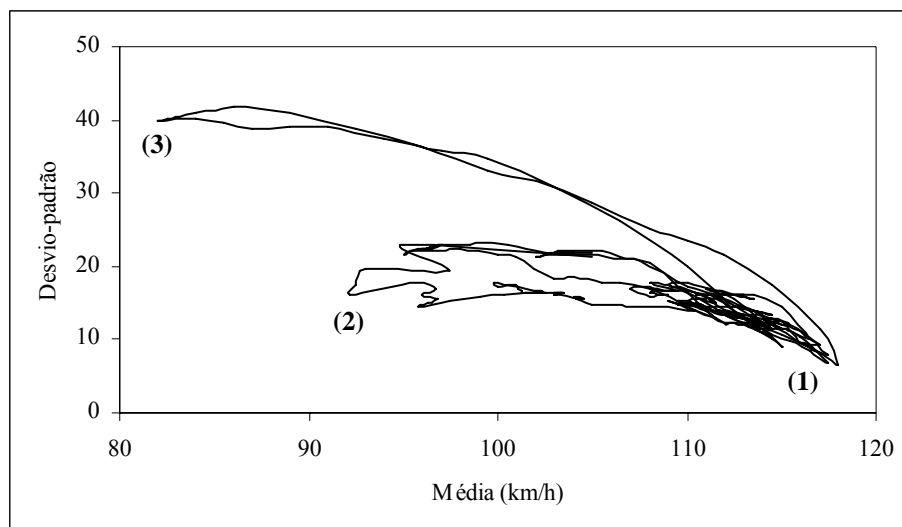


Figura 26 – Desvio-padrão em função da média em km/h para subamostras de 30 veículos. (1) – Tráfego rápido e pouco denso. (2) – Tráfego rápido e denso. (3) – Tráfego lento e congestionado.

Neste exemplo nunca se chegou ao bloqueio total, pois a velocidade média não foi inferior a 80 km/h.

O método das janelas deslizantes permite identificar as fases de tráfego, mais congestionado e menos congestionado.

7.3 “Semáforo” e/ou obstáculo

Simulou-se um percurso com 0,2 de intensidade de tráfego, aumentando até 0,3 e depois diminuindo até 0,2, e com 11,2 % de pesados.

Quanto à probabilidade de um veículo abrandar mesmo com espaço para acelerar é de 0,5.

Para estas condições foram elaboradas algumas simulações, incluindo um “semáforo”, um obstáculo ou um “semáforo” e um obstáculo simultaneamente.

7.3.1 Uma paragem no “semáforo”

Colocou-se um “semáforo” na posição 600, ou seja, ao quilómetro 5,1, provocando uma paragem do instante 250 ao instante 400.

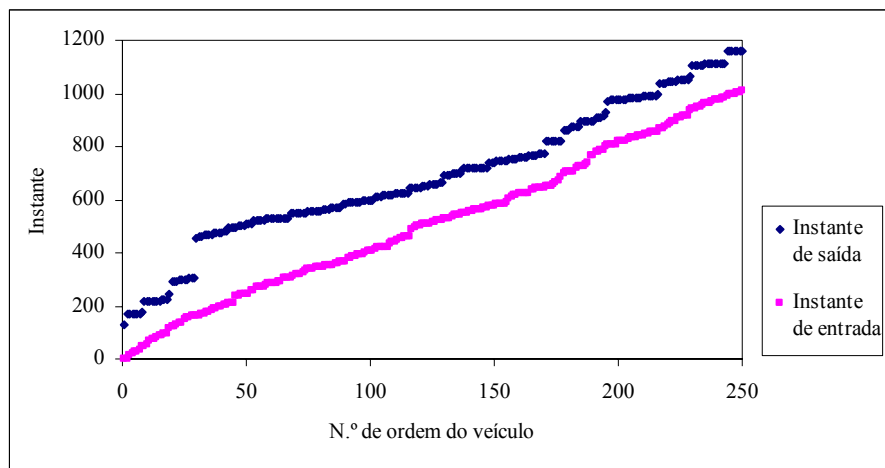


Figura 27 – Instantes de entrada e saída da via de cada veículo, quando implementado um “semáforo”.

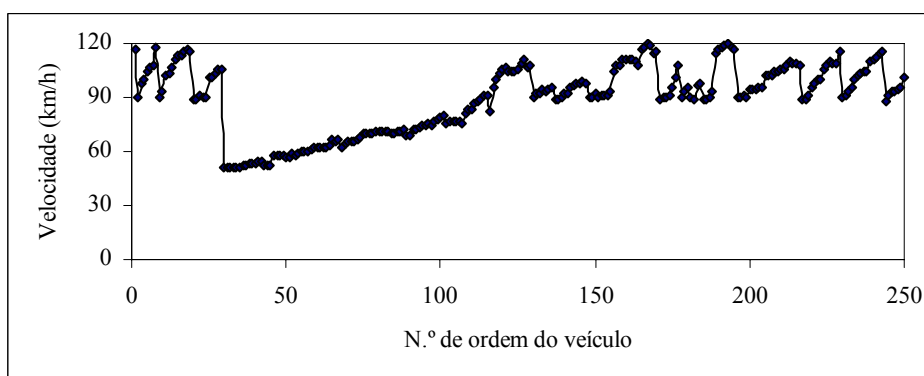


Figura 28 – Velocidade média do trajeto em km/h de cada veículo, quando implementado um “semáforo”.

Pode-se concluir que a paragem provocou algum congestionamento o qual só aliviou completamente a partir do 120º veículo. Esta paragem levou também a que houvesse uma diminuição brusca da velocidade média do percurso que vai aumentando lentamente.

7.3.2 Um obstáculo

Colocou-se um obstáculo ao quinto veículo no instante 50, que provocou uma paragem de 50 instantes.

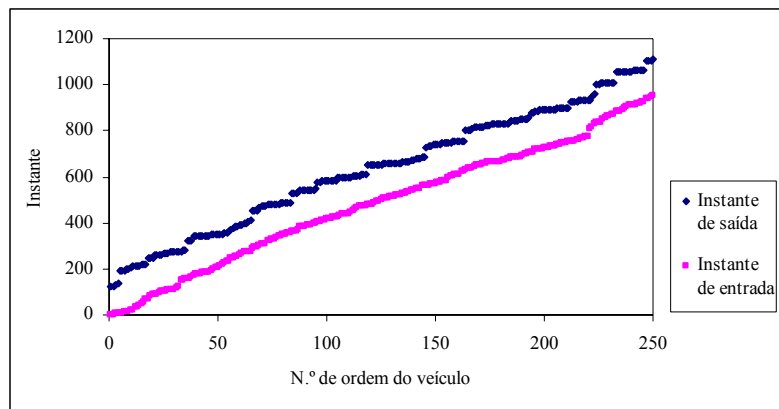


Figura 29 – Instantes de entrada e saída de cada veículo, quando implementado um obstáculo.

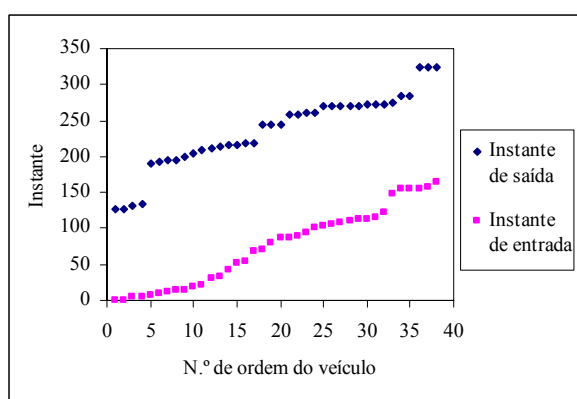


Figura 30 – Instantes de entrada e saída para os 40 primeiros veículos, quando implementado um obstáculo.

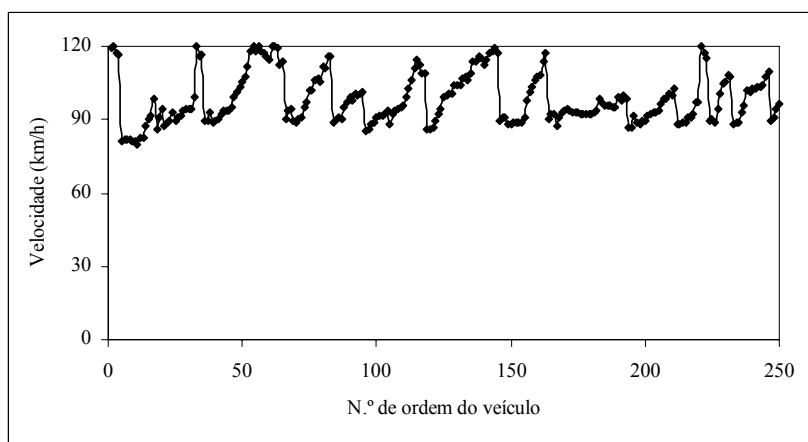


Figura 31 – Velocidade média do trajeto em km/h de cada veículo, quando implementado um obstáculo.

A colocação do obstáculo não causou grandes alterações pois o tempo de paragem não foi muito significativo. No entanto, após a paragem observa-se algum congestionamento que tornou o tráfego mais lento.

É de referir que os veículos pesados também podem provocar algum congestionamento e uma diminuição na velocidade dos ligeiros.

7.3.3 Uma paragem no “semáforo” e um obstáculo

Conjugaram-se duas paragens, uma ao instante 50, provocando a paragem ao quinto veículo, durante 50 instantes e outra na posição 600, desde o instante 250 até ao instante 400.

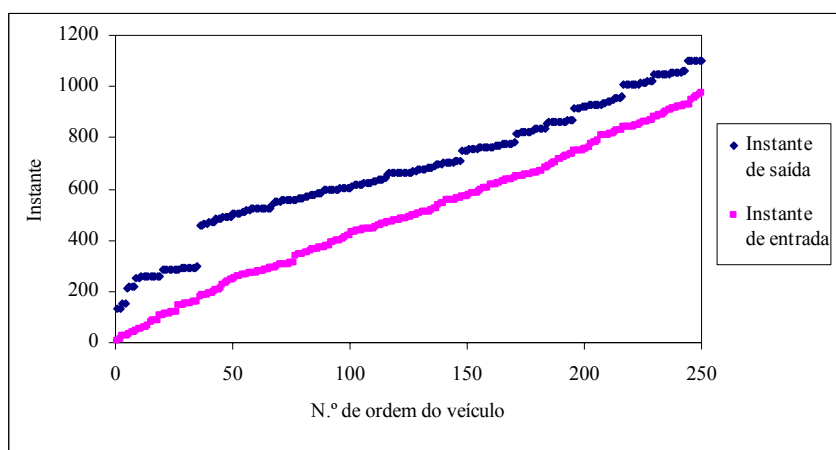


Figura 32 – Instantes de entrada e saída da via de cada veículo, quando implementado um “semáforo” e um obstáculo.

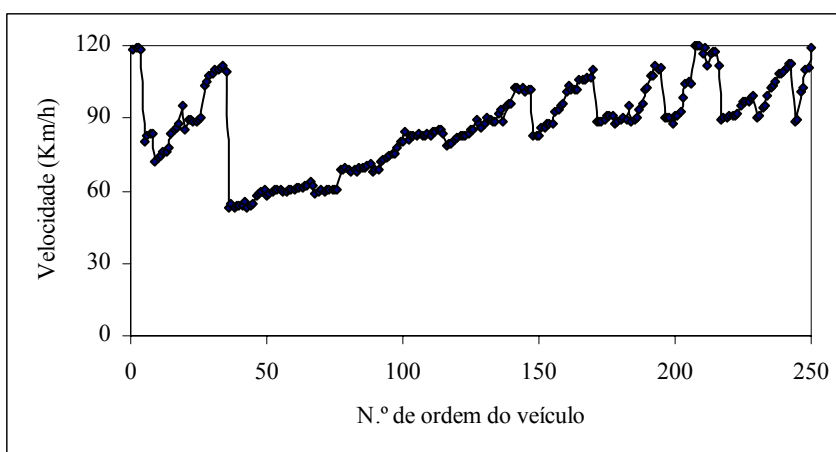


Figura 33 – Velocidade média do trajecto em km/h de cada veículo, quando implementado um “semáforo” e um obstáculo.

A colocação simultânea de um “semáforo” e um obstáculo causou muito congestionamento. Quando o tráfego começou a fluir após a primeira paragem surgiu a segunda que provocou um grande congestionamento e um tráfego lento.

Conclusões

Obteve-se um simulador de tráfego razoável que foi testado.

Este protótipo com o apoio de engenheiros de tráfego e acústica está pronto para ser adaptado a muitas situações reais.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros propõe-se:

- discutir as discretizações convenientes do tempo, do espaço, etc;
- implementações ao programa, nomeadamente, a criação de cruzamentos, de duas vias, de ultrapassagens, outro tipo de veículos, um conjunto de semáforos, etc;
- realizar amostragens de valores do ruído;
- testar o uso do programa com alunos do Ensino Básico e Secundário.

Referências Bibliográficas

- (22 de Agosto de 2003). "*Recomendação da Comissão de 6 de Agosto de 2003 relativa às orientações sobre os métodos de cálculo provisórios revistos para o ruído industrial, o ruído das aeronaves e o ruído de tráfego rodoviário e ferroviário, bem como dados de emissões relacionados.*" Jornal Oficial da União Europeia.
- (1998). "*Basic Concepts of Sound.*" Bruel & Kjaer.
- (1998). "*Basic Frequency Analysis of Sound.*" Bruel & Kjaer.
- (2004). "*Horizontal Guidance for Noise. Part 2 - Noise Assessment and Control.*" Scottish Environment Protection Agency.
- (25 de Junho de 2002). "*Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu do Conselho relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente.*" Jornal Oficial das Comunidades Europeias.
- (Fevereiro de 2003). "*Directrizes para a Elaboração de Planos de Monitorização de Ruído de Infra-Estruturas Rodoviárias e Ferroviárias.*" Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente - Instituto do Ambiente.
- Apostol, T. M. (1969). "*Calculus.*" Volume II, segunda edição. Xerox.
- Calheiros, F. (2002). "*Mean and standard deviation in mixtures.*" Páginas 24-27. Joclad 2002 - IX Jornadas de Classificação e Análise de Dados, Lisboa.
- Calheiros, F.; Faria, S.; Rodrigues, C. (1998). "*Modelação Estocástica com Autómatos Celulares do Tráfego Real.*" Actas VI - Congresso da Sociedade Portuguesa de Estatística Tomar. Edição SPE, páginas 171-178.
- Campos, L. (2001). "*Programação em Visual Basic 6.*"
- Carriço, R. F. S.; Carriço, J. A. S. (1998). "*Visual Basic 5.0.*" Lisboa, Portugal. CTI edições - Centro de tecnologias de informação. Lda.
- Carvalho, A. P. O. (2004). "*Acústica Ambiental e de Edifícios.*" Departamento de Engenharia Civil - Licenciatura em Engenharia Civil
- Cochinos, R. (2000). "*Introduction to the Theory of Cellular Automata and One-Dimensional Traffic Simulation.*" Página web <http://www.theory.org/complexity/traffic/> [Consulta em Outubro de 2005].
- Counet, A. (1994). "*Etudes de Rentabilite Economique et Financiere.*" Página web <http://www.stratec.be/Articles/AGIR94-AC.pdf>.

- Deus, J. D.; Pimenta, M.; Noronha, A.; Peña, T.; Brogueira, P. (1992). "*Introdução à Física.*"
- Dufournet, D.; Jouenne, P. "*Madras, an Intelligent Assistant for Noise Recognition.*"
- Everest, F. A. (2000). "*The master handbook of acoustics.*"
- Faria, S. (1998). "*Elementos de Modelação, Simulação e Tratamento Estatístico do Tráfego.*" Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.
- Fernandes, J. M. A. (1998). "*MAGOO - Metodologia baseada em agentes e orientada por objectos.*" Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.
- Filho, B. S. S.; Cerqueira, G. C.; Araújo, W. L.; Voll, E. (2004). "*Modelagem de Dinâmica de Paisagem: Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação baseados em Autômato Celular*", Página web http://www.csr.ufmg.br/csr/publicacoes/dinamica_ac.pdf.
- Fonseca, J. (2001). "*Estatística Matemática.*" Volume 1. Lisboa, Portugal. Edições Sílabo.
- Gerges, S. N. Y. (1992). "*Ruído: Fundamentos e Controles.*" Editora: NR Consultoria e Treinamento.
- Gutowitz, H. A.; Langton, C. G. (1988). "*Methods for Designing Cellular Automata with "Interesting" Behavior.*" Página web <http://www.santafe.edu/~hag/interesting.html> [consulta em Outubro de 2005].
- Hincu, G. (2003). "*Computer assisted evaluation of traffic noise level.*" Technical Acoustics.
- IA (2004). "*O Ruído e a Cidade.*" Instituto do Ambiente.
- IMAGINE. (2005). "*Review of the Suitability of Traffic Models for Noise Modelling.*" Página web <http://www.imagine-project.org>.
- Kinsler, L. E.; Frey, A. R.; Coppens, A. B.; Sanders, J. V. (2000). "*Fundamentals of Acoustics.*" Quarta edição. Wiley.
- Lárraga, M. E. (2005). "*Cellular Automata for One-Lane Traffic Flow Modelling: Safety and Automation.*" Página web http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0112/0112082.pdf [Consulta em Setembro de 2005].
- Lazzarini, V. (1988). "*Elementos de Acústica.*" Página web http://www.nuim.ie/academic/music/vlazzarini/papers/Elementos_de_Acustica.pdf.
- Leclercq, L. (2002). "*Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier.*" Tese de Doutoramento. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon.

- Leclercq, L.; Lelong, J. (2001). "Dynamic evaluation of urban traffic noise." Página web http://www.inrets.fr/ur/ite/publications/publications-pdf/Lelong-publi/bruit_de_trafic_1.pdf.
- Maerivoet, S.; Logghe, S.; Moor, B.; Immers, B. (2003). "A Comparison of a Cellular Automaton and a Macroscopic Model." Página web http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0406/0406286.pdf [Consulta em Outubro de 2005].
- Maerivoet, S.; Moor, B. (2005). "Cellular Automata Models of Road Traffic." Página web http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0509/0509082.pdf. [Consulta em 12 de Setembro de 2005].
- Maerivoet, S.; Moor, B. D. (2005). "Traffic Flow Theory." Página web http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0507/0507126.pdf. [Consulta em Julho de 2005].
- Makanae, K.; Takahashi, K. (2004). "3D Traffic Noise Simulator for VR Environment." School of Project Design, Miyagi University.
- MET. (1996). "Achèvement de l'autoroute A8 et de la liaison E25-E40 - Étude économique. ." Página web <http://rouages.met.wallonie.be/metpub/src/trafic11/index.html>.
- Nagel, K. (1995). "Particle hopping models and traffic flow theory." Página web http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/9509/9509075.pdf [Consulta em Setembro 2005].
- Oliveira, M. G. A. (2005). "Propagação do Fogo e Dinâmicas Florestais." Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Patel, J. K.; Kapadia, C. H.; Owen, D. B. (1988). "Handbook of Statistical Distributions." New York and Basel. Marcel Dekker, Inc.
- RGR (14 de Novembro de 2000). "Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 259/2002, de 23 de Novembro, que aprova o Regime Legal sobre Poluição Sonora."
- Rickert, M.; Nagel, K.; Schreckenberg, M.; Latour, A. (2005). "Two Lane Traffic Simulations using Cellular Automata." Página web http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/9512/9512119.pdf. [Consulta em Setembro de 2005].
- Rio, J. A.; Lárraga, M. E. (2005). "Transient situations in traffic flow: Modelling the Mexico City Cuernavaca Highway." Página web http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0501/0501561.pdf [Consulta em Setembro de 2005].
- Silva, P. M. (1975). "Ruído de tráfego rodoviário urbano." Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Soares, A. (2000). "*Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente.*" Lisboa, Portugal. IST Press, Instituto Superior Técnico.

Spiegel, M. R. (1978). "*Probabilidade e estatística.*" Coleção Schaum, Makron Books.

Steele, C. (2001). "*A critical review of some traffic noise prediction models.*" Volume 62, Issue 3: Pág. 271-287. Página web <http://www.sciencedirect.com> [Consulta em Março 2006].

Tsay, J. S.; Lo, J. J.; Lin, Y. S. (2003). "*The Study of Mathematical Model for Predicting Road Traffic Noise.*" Tamkang Journal of Science and Engineering: Volume 6, N.º 2: 111-120.

Wolfram, S. (1982). "*Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems.*" Página web <http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/>.

Anexos

Anexo A: Programa Tráfego

```
Dim c, pes, i1, i2 As Integer
Dim b, x, j, K, v, xx As Integer
Dim t, te, t1, t2 As Integer
Dim vl, vp As Integer
Dim dist As Integer
Dim n As Integer
Dim p, pp, a, pos, velm, Q As Double
Dim lambda, lam, s, tem1, tem2, tems, teme, te250 As Double
Dim temp_veículo(1 To 3000) As Long
Dim pos_veículo(1 To 3000) As Long
Dim vel_veículo(1 To 3000) As Long
Dim tipo_veículo(1 To 3000) As Long
Dim Lo(1 To 3000) As Integer
Dim L(1 To 3000) As Integer
Dim Leq As Integer
Dim segundos As Long
Dim veículos As Integer
Dim a1, a2, e, f, g, h, i, d, w, z, inst, inst1, aa, velv, cr As Integer
Dim p1, p2, vv, vvv, nv, vm, dd, m As Integer
```

```
Private Sub cmdExp_Click()
    FlexGrid_To_Excel Grid1, Grid1.Rows, Grid1.Cols, , "Dados"
End Sub
```

```
Private Sub cmdExp2_Click()
    FlexGrid_To_Excel Grid2, Grid2.Rows, Grid2.Cols, , "Dados"
End Sub
```

'Esta tabela encontra-se desactivada

```
' Private Sub cmdExp3_Click()
'     FlexGrid_To_Excel Grid3, Grid3.Rows, Grid3.Cols, , "Dados"
' End Sub
```

'Funcionalidade dos botões da interface

```
Private Sub Continuar_Click()
    If Continuar = True Then Timer1.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub Parar_Click()
    If Parar = True Then Timer1.Enabled = False
End Sub
```

```
Private Sub Sair_Click()  
    Dim sairr  
    sairr = MsgBox("Tem a certeza de que pretende sair?", vbYesNo, "Sair")  
    If sairr = 6 Then End  
End Sub
```

' Definir alertas ao utilizador

```
Private Sub text1_LostFocus()  
    If Text1.Text < 0 Then  
        MsgBox "O valor de p não pode ser inferior a 0.", vbExclamation, "Erro"  
        Text1.SetFocus  
        Text1.Text = "0,5"  
    End If  
    If Text1.Text > 1 Then  
        MsgBox "O valor de p não pode ser superior a 1.", vbExclamation, "Erro"  
        Text1.SetFocus  
        Text1.Text = "0,5"  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text3_LostFocus()  
    If Text3.Text < 0 Then  
        MsgBox "A proporção de pesados não pode ser inferior a 0.", vbExclamation, "Erro"  
        Text3.SetFocus  
        Text3.Text = "10"  
    End If  
    If Text3.Text > 100 Then  
        MsgBox "A proporção de pesados não pode ser superior a 100.", vbExclamation,  
"Erro"  
        Text3.SetFocus  
        Text3.Text = "10"  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text5_LostFocus()  
    If (Text5.Text <= 0 Or Text5.Text > 3000) Then  
        MsgBox "O número de veículos tem de ser superior a 0 e inferior ou igual a 3000.",  
vbExclamation, "Erro"  
        Text5.Text = "3000"  
        Text5.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text6_LostFocus()  
    If (Text6.Text <= 0) Then  
        MsgBox "O tempo não pode ser inferior a 0.", vbExclamation, "Erro"
```

```
        Text6.Text = "2000"
        Text6.SetFocus
    End If
    If (Text6.Text >= 175000) Then
        MsgBox "O tempo não pode ser superior a 174999.", vbExclamation, "Erro"
        Text6.Text = "2000"
        Text6.SetFocus
    End If
End Sub

Private Sub text10_LostFocus()
    If (Text10.Text < 0 Or Text10.Text > 1000) Then
        MsgBox "O valor não pode ser inferior a 0 nem superior a 1000.", vbExclamation,
"Erro"
        Text10.Text = "100"
        Text10.SetFocus
    End If
End Sub

Private Sub text11_LostFocus()
    If (Text11.Text <= 0) Then
        MsgBox "O número de veículos por unidade de tempo tem de ser superior a 0.",
vbExclamation, "Erro"
        Text11.Text = "1"
        Text11.SetFocus
    End If
    If (Text11.Text > 25) Then
        MsgBox "Deveria utilizar um menor número de veículos por unidade de tempo, pois o
programa pode bloquear.", vbExclamation, "Erro"
    End If
End Sub

Private Sub text12_LostFocus()
    If (Text12.Text < 0 Or Text12.Text > 1000) Then
        MsgBox "O valor não pode ser inferior a 0 nem superior a 1000.", vbExclamation,
"Erro"
        Text12.Text = "1000"
        Text12.SetFocus
    End If
End Sub

Private Sub text15_LostFocus()
    n = Text5.Text
    If (Text15.Text < 0 Or Text15.Text > n) Then
        MsgBox "O valor não pode ser inferior a 0 nem superior ao número de veículos.",
vbExclamation, "Erro"
        Text15.Text = "1"
        Text15.SetFocus
    End If
End Sub
```

```
End If  
End Sub
```

```
Private Sub text16_LostFocus()  
    If (Text16.Text < 0 Or Text16.Text > 1000) Then  
        MsgBox "Este valor não pode ser inferior a 0 nem superior a 1000.", vbExclamation,  
        "Erro"  
        Text16.Text = "500"  
        Text16.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text14_LostFocus()  
    If (Text14.Text < 0 Or Text14.Text > Text6.Text) Then  
        MsgBox "Este valor não pode ser inferior a 0 nem superior ao tempo de simulação.",  
        vbExclamation, "Erro"  
        Text14.Text = "100"  
        Text14.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text17_LostFocus()  
    If (Text17.Text < 0 Or Text17.Text > Text6.Text) Then  
        MsgBox "Este valor não pode ser inferior a 0 nem superior ao tempo de simulação.",  
        vbExclamation, "Erro"  
        Text17.Text = "1"  
        Text17.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text13_LostFocus()  
    If (Text13.Text < 0 Or Text13.Text > Text14.Text) Then  
        MsgBox "Este valor não pode ser inferior a 0 nem superior ao valor do instante até ao  
        qual pretende a simulação.", vbExclamation, "Erro"  
        Text13.Text = "1"  
        Text13.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub text19_LostFocus()  
    If (Text19.Text < 8 Or Text19.Text > 992) Then  
        MsgBox "Este valor não pode ser inferior a 8 nem superior a 992.", vbExclamation,  
        "Erro"  
        Text13.Text = "1"  
        Text13.SetFocus  
    End If  
End Sub
```

'Funcionalidade dos botões da interface

```
Private Sub Check1_Click()  
    If Check1.Value = 1 Then Check2.Value = 0  
End Sub
```

```
Private Sub Check2_Click()  
    If Check2.Value = 1 Then Check1.Value = 0  
End Sub
```

```
Private Sub Check3_Click()  
    If Check3.Value = 1 Then Check4.Value = 0  
End Sub
```

```
Private Sub Check4_Click()  
    If Check4.Value = 1 Then Check3.Value = 0  
End Sub
```

'Início do tráfego

```
Private Sub Iniciar_Click()  
    Form_Activate  
    Timer1.Enabled = True  
    segundos = 0
```

'Atribuição do número de veículos e intensidade de tráfego definidos pelo utilizador

```
n = Text5.Text  
lambda = Text11.Text
```

'Tabelas para exportação (3ª tabela desactivada)

```
Grid1.Cols = 2  
Grid2.Cols = 9  
Grid3.Cols = n + 1  
Grid1.Row = 0  
Grid1.Col = 0  
Grid1.Text = "Instante"  
Grid1.Row = 0  
Grid1.Col = 1  
Grid1.Text = "Nível (dB)"  
' Grid3.Row = 0  
' Grid3.Col = 0  
' Grid3.Text = "Instante"
```

'Atribuição das posições a registar na tabela definidas pelo utilizador

```
pos1 = Text10.Text
```

```
pos2 = Text12.Text
```

'1ª linha da 2ª tabela

```
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 0
Grid2.Text = "Veículo"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 1
Grid2.Text = "Tipo"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 2
Grid2.Text = pos1 & "ª posição"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 3
Grid2.Text = pos2 & "ª posição"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 4
Grid2.Text = "Tempo de entrada"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 5
Grid2.Text = "Instante de entrada"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 6
Grid2.Text = "Instante de saída"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 7
Grid2.Text = "Velocidade de entrada"
Grid2.Row = 0
Grid2.Col = 8
Grid2.Text = "Velocidade de saída"
```

'1ª linha da 3ª tabela em Excel (desactivada)

```
' For xx = 50 To 99
'   Grid3.Row = 0
'   Grid3.Col = xx - 49
'   Grid3.Text = "1" & xx
' Next xx
' For xx = 0 To 9
'   Grid3.Row = 0
'   Grid3.Col = xx + 49
'   Grid3.Text = "20" & xx
' Next xx
' For xx = 10 To 50
'   Grid3.Row = 0
'   Grid3.Col = xx + 50
'   Grid3.Text = "2" & xx
```

' Next xx

'Criar, aleatoriamente, os tempos de entrada tendo em conta a intensidade de tráfego

c = 0

a1 = 0

a2 = 0

For j = 1 To n

 If Check9.Value = 0 Then

 Randomize

 t = Round((-1 / lambda) * Log(Rnd), 0)

 End If

 lam = 0

 If Check9.Value = 1 Then

 If j <= Round((0.02 * n), 0) Then

 Randomize

 t = Round((-1 / lambda) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If (j > Round((0.02 * n), 0) And j <= Round((0.05 * n), 0)) Then

 lam = lambda + 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If (j > Round((0.05 * n), 0) And j <= Round((0.1 * n), 0)) Then

 lam = lambda + 2 * 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If ((j > Round((0.1 * n), 0) And j <= Round((0.15 * n), 0))) Then

 lam = lambda + 3 * 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If (j > Round((0.15 * n), 0) And j <= Round((0.2 * n), 0)) Then

 lam = lambda + 4 * 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If (j > Round((0.2 * n), 0) And j <= Round((0.6 * n), 0)) Then

 lam = lambda + 5 * 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

 End If

 If (j > Round((0.6 * n), 0) And j <= Round((0.8 * n), 0)) Then

 lam = lambda + 4 * 0.02

 Randomize

 t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)

```
End If
If (j > Round((0.8 * n), 0) And j <= Round((0.85 * n), 0)) Then
    lam = lambda + 3 * 0.02
    Randomize
    t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)
End If
If (j > Round((0.85 * n), 0) And j <= Round((0.9 * n), 0)) Then
    lam = lambda + 2 * 0.02
    Randomize
    t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)
End If
If (j > Round((0.9 * n), 0) And j <= Round((0.95 * n), 0)) Then
    lam = lambda + 0.02
    Randomize
    t = Round((-1 / lam) * Log(Rnd), 0)
End If
If (j > Round((0.95 * n), 0)) Then
    Randomize
    t = Round((-1 / lambda) * Log(Rnd), 0)
End If
End If
If t = 0 Then t = 1
```

'Acumular os tempos de entrada

```
If t > 0 Then
    te = te + t
    c = c + 1
    temp_veículo(j) = te
End If
Grid2.Rows = n + 1
Grid2.Row = j
Grid2.Col = 4
Grid2.Text = te
Next j
```

'Criar tipo de veículo, aleatoriamente, e calcular número de pesados

```
pes = 0
```

'Atribuição da proporção de pesados definida pelo utilizador

```
pp = Text3.Text
For j = 1 To n
    tipo_veículo(j) = 0
    Randomize
```

'Escrever na 2ª linha da tabela em Excel o tipo de veículo

```
If Rnd * 100 > pp Then tipo_veículo(j) = 1
If Check3.Value = 1 Then tipo_veículo(1) = 0 '1º veículo pesado
If Check4.Value = 1 Then tipo_veículo(1) = 1 '1º veículo ligeiro
```

'Criar velocidade de cada veículo, dado o seu tipo

'tipo_veículo = 1, veículo ligeiro

'tipo_veículo <> 1, veículo pesado

```
If Check1.Value = 1 Then 'todos os veículos iniciam com velocidade zero
    vel_veículo(j) = 0
    If tipo_veículo(j) = 0 Then
        pes = pes + 1 'determinar número de pesados
    End If
End If
If Check2.Value = 1 Then 'todos os veículos iniciam com velocidade diferente de
zero
    If tipo_veículo(j) = 1 Then
        Randomize
        vl = Int(Rnd * 8) + 1
        vel_veículo(j) = vl
    Else
        Randomize
        vp = Int(Rnd * 6) + 1
        vel_veículo(j) = vp
        If tipo_veículo(j) = 0 Then
            pes = pes + 1 'determinar número de pesados
        End If
    End If
End If
Next j
```

'Escrever número de pesados

```
If pes <> 1 Then Text4.Text = pes & " veículos pesados"
If pes = 1 Then Text4.Text = "1 veículo pesado"
End Sub
```

```
Private Sub Form_Activate()
    veículos = 0
    dist = 0
```

'Pintar estrada

```
Picture1.BackColor = QBColor(8)
Picture2.BackColor = QBColor(8)
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
```

```
'Preencher a tabela ao longo do tempo
```

```
    segundos = segundos + 1  
    s = 0  
    soma = 0  
    a = Text7.Text  
    t1 = Text8.Text  
    t2 = Text9.Text  
    p1 = 0  
    p2 = 0  
    Text2.Text = segundos  
    nv = 0  
    vm = 0  
    kp = 0  
    Leq = 0  
    Grid1.Rows = segundos + 1  
    Grid1.Row = segundos  
    Grid1.Col = 0  
    Grid1.Text = segundos
```

```
'Instantes múltiplos (esta versão está desactivada)
```

```
' If Check7.Value = 1 Then  
'     For b = 1 To segundos  
'         If b = segundos / a Then  
'             Grid1.Rows = b + 2  
'             Grid1.Row = b + 1  
'             Grid1.Col = 0  
'             Grid1.Text = a * b  
'         End If  
'     Next b  
' End If
```

```
'Instantes de t1 a t2 (esta versão está desactivada)
```

```
' If Check8.Value = 1 Then  
'     If segundos >= t1 And segundos <= t2 Then  
'         Grid1.Rows = (t2 - t1) + 3  
'         Grid1.Row = segundos - t1 + 2  
'         Grid1.Col = 0  
'         Grid1.Text = segundos  
'     End If  
' End If
```

'Instantes do início ao fim (esta versão está desactivada)

```
' If (Check7.Value = 0 And Check8.Value = 0) Then
'   Grid1.Rows = segundos + 2
'   Grid1.Row = segundos + 1
'   Grid1.Col = 0
'   Grid1.Text = segundos
' End If

  If segundos <= n Then
    Grid2.Rows = n + 1
    Grid2.Row = segundos
    Grid2.Col = 0
    Grid2.Text = segundos
  End If

' Grid3.Rows = segundos + 1
' Grid3.Row = segundos
' Grid3.Col = 0
' Grid3.Text = segundos
```

'Atribuição do parâmetro de instabilidade e do número de veículos definidos pelo utilizador

```
p = Text1.Text
n = Text5.Text
i1 = 1
i2 = 1
Timer1.Interval = Slider1.Value
Slider1.Enabled = True
```

'Associar o tempo de entrada ao tempo de simulação

```
For K = 1 To n
  If temp_veículo(K) = segundos Then
    veículos = veículos + 1
  End If
Next K
```

'Criar tráfego

```
For v = 1 To veículos
```

'Variação da intensidade de tráfego

```
  If Check9.Value = 1 Then
    If (v <= Round((0.02 * n), 0)) Then Text11.Text = lambda
    If (v > Round((0.02 * n), 0) And v <= Round((0.05 * n), 0)) Then Text11.Text
    = lambda + 0.02
```

```

    If (v > Round((0.05 * n), 0) And v <= Round((0.1 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 2 * 0.02
    If ((v > Round((0.1 * n), 0) And v <= Round((0.15 * n), 0))) Then Text11.Text =
lambda + 3 * 0.02
    If (v > Round((0.15 * n), 0) And v <= Round((0.2 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 4 * 0.02
    If (v > Round((0.2 * n), 0) And v <= Round((0.6 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 5 * 0.02
    If (v > Round((0.6 * n), 0) And v <= Round((0.8 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 4 * 0.02
    If (v > Round((0.8 * n), 0) And v <= Round((0.85 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 3 * 0.02
    If (v > Round((0.85 * n), 0) And v <= Round((0.9 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 2 * 0.02
    If (v > Round((0.9 * n), 0) And v <= Round((0.95 * n), 0)) Then Text11.Text =
lambda + 0.02
    If (v > Round((0.95 * n), 0)) Then Text11.Text = lambda
End If

```

'Aumentar a velocidade

```

vel_veículo(v) = vel_veículo(v) + 1
e = Text13.Text
f = Text14.Text
g = Text15.Text
h = Text16.Text
aa = Text17.Text
m = Text18.Text

```

'Implementação do obstáculo

```

If Check5.Value = 1 Then
    If (segundos >= e And segundos <= f) Then vel_veículo(g) = 0
End If

```

'Implementação do "semáforo"

```

If Check6.Value = 1 Then
    If (pos_veículo(v) <= h And (pos_veículo(v) + vel_veículo(v)) >= h) And
(segundos >= aa And segundos < (aa + m)) Then vel_veículo(v) = 0
End If
If v <> 1 Then

```

'Variação da intensidade de tráfego

```

If Check9.Value = 1 Then
    If (v <= Round((0.02 * n), 0)) Then Text11.Text = lambda

```

```

If (v > Round((0.02 * n), 0) And v <= Round((0.05 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 0.02
If (v > Round((0.05 * n), 0) And v <= Round((0.1 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 2 * 0.02
If ((v > Round((0.1 * n), 0) And v <= Round((0.15 * n), 0))) Then
Text11.Text = lambda + 3 * 0.02
If (v > Round((0.15 * n), 0) And v <= Round((0.2 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 4 * 0.02
If (v > Round((0.2 * n), 0) And v <= Round((0.6 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 5 * 0.02
If (v > Round((0.6 * n), 0) And v <= Round((0.8 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 4 * 0.02
If (v > Round((0.8 * n), 0) And v <= Round((0.85 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 3 * 0.02
If (v > Round((0.85 * n), 0) And v <= Round((0.9 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 2 * 0.02
If (v > Round((0.9 * n), 0) And v <= Round((0.95 * n), 0)) Then
Text11.Text = lambda + 0.02
If (v > Round((0.95 * n), 0)) Then Text11.Text = lambda
End If

```

'Analisar distância ao veículo da frente, actualizar velocidade

```

dist = Abs(pos_veículo(v - 1) - pos_veículo(v))
If tipo_veículo(v - 1) = 1 Then 'veículo ligeiro
If (dist - 1) <= vel_veículo(v) Then
vel_veículo(v) = dist - 1
End If
End If
If tipo_veículo(v - 1) <> 1 Then 'veículo pesado
If (dist - 2) <= vel_veículo(v) Then
vel_veículo(v) = dist - 2
End If
End If
End If

```

'Desacelerar, aleatoriamente, dado parâmetro de instabilidade

```

Randomize
If Rnd < p Then vel_veículo(v) = vel_veículo(v) - 1

```

'Não permitir que ultrapassem a velocidade máxima

```

If (tipo_veículo(v) = 1 And vel_veículo(v) > 8) Then vel_veículo(v) = 8
If (tipo_veículo(v) <> 1 And vel_veículo(v) > 6) Then vel_veículo(v) = 6

```

'Não permitir que a velocidade assuma valores negativos

```
If vel_veículo(v) < 0 Then vel_veículo(v) = 0
```

'Avançar com o veículo

```
pos_veículo(v) = pos_veículo(v) + vel_veículo(v)  
a = Text7.Text
```

'Esta funcionalidade de registar na tabela os instantes múltiplos está desactivada

```
' If Check7.Value = 1 Then  
' For b = 1 To segundos  
'   If b = segundos / a Then  
'     Grid1.Rows = b + 2  
'     Grid1.Row = b + 1  
'     Grid1.Col = n + 1  
'     Grid1.Text = p2  
'   End If  
' Next b  
' End If
```

'Escrever posições dos veículos na tabela

```
a = Text7.Text  
t1 = Text8.Text  
t2 = Text9.Text  
pos1 = Text10.Text  
pos2 = Text12.Text
```

'Instantes múltiplos (funcionalidade desactivada)

```
' If Check7.Value = 1 Then  
'   For b = 1 To segundos  
'     If b = segundos / a Then  
'       Grid1.Row = b + 1  
'       Grid1.Col = v  
'       Grid1.Text = pos_veículo(v)  
'     End If  
'   Next b  
' End If
```

'Instantes de t1 a t2 (funcionalidade desactivada)

```
' If Check8.Value = 1 Then  
'   For d = t1 To t2  
'     If d = segundos Then  
'       Grid1.Row = (d - t1) + 2
```

```
'      Grid1.Col = v
'      Grid1.Text = pos_veículo(v)
'      End If
'      Next d
'      End If
```

'Instantes do início ao fim (funcionalidade desactivada)

```
'      If (Check7.Value = 1 And Check8.Value = 1) Then
'          Grid1.Col = 0
'          Grid1.Text = segundos
'          Grid1.Row = segundos + 1
'          Grid1.Col = v
'          Grid1.Text = pos_veículo(v)
'      End If
```

'Calcular e registar o instante de passagem de cada veículo em duas posições

```
      Grid2.Row = i1
      Grid2.Col = 1
      If tipo_veículo(v) = 0 Then Grid2.Text = "Pesado"
      If tipo_veículo(v) = 1 Then Grid2.Text = "Ligeiro"
      If (pos_veículo(v) >= pos1 And (pos_veículo(v) - vel_veículo(v)) <= pos1) Then
          Grid2.Col = 2
          If vel_veículo(v) = 0 Then
              Grid2.Text = segundos + 1
          Else
              tem1 = segundos - ((pos_veículo(v) - pos1) / (vel_veículo(v)))
              Grid2.Text = FormatNumber(Round(tem1, 2), 2)
          End If
      End If
      If (pos_veículo(v) >= pos2 And (pos_veículo(v) - vel_veículo(v) <= pos2)) Then
          Grid2.Col = 3
          If vel_veículo(v) = 0 Then
              Grid2.Text = segundos + 1
          Else
              tem2 = segundos - ((pos_veículo(v) - pos2) / (vel_veículo(v)))
              Grid2.Text = FormatNumber(Round(tem2, 2), 2)
          End If
      End If
      i1 = i1 + 1
```

'Calcular e registar os instantes de entrada e saída de cada veículo

```
      If (pos_veículo(v) >= 0 And (pos_veículo(v) - vel_veículo(v)) <= 0) Then
          Grid2.Row = v
          Grid2.Col = 5
          If vel_veículo(v) = 0 Then
```

```

        Grid2.Text = segundos + 1
    Else
        teme = segundos - ((pos_veículo(v)) / (vel_veículo(v)))
        Grid2.Text = FormatNumber(Round(teme, 2), 2)
    End If
    Grid2.Row = v
    Grid2.Col = 7
    Grid2.Text = vel_veículo(v)
End If
If (pos_veículo(v) >= 1000 And (pos_veículo(v) - vel_veículo(v)) <= 1000) Then
    Grid2.Row = v
    Grid2.Col = 6
    tems = segundos - ((pos_veículo(v) - 1000) / (vel_veículo(v)))
    Grid2.Text = FormatNumber(Round(tems, 2), 2)
    Grid2.Row = v
    Grid2.Col = 8
    Grid2.Text = vel_veículo(v)
End If

```

'Calcular o nível sonoro (Lo) de cada veículo em cada instante (funcionalidade desactivada)

```

' If tipo_veículo(v) = 1 Then
'   If vel_veículo(v) >= 4 Then Lo(v) = Round((38.1 * ((Log(15 * vel_veículo(v))) /
(Log(10))) - 2.4), 0)
'   If vel_veículo(v) < 4 Then Lo(v) = 62
'   End If
' If tipo_veículo(v) = 0 Then
'   If vel_veículo(v) >= 4 Then Lo(v) = Round((33.9 * ((Log(15 * vel_veículo(v))) /
(Log(10))) + 16.4), 0)
'   If vel_veículo(v) < 4 Then Lo(v) = 74
'   End If
' Grid3.Row = segundos + 1
' Grid3.Col = v
' Grid3.Text = Lo(v)
' Grid3.Text = pos_veículo(v)
' If (pos_veículo(v) > 1001 Or pos_veículo(v) = 0) Then Grid3.Text = ""
' For i = 1 To n
'   If (pos_veículo(i) = 0 Or pos_veículo(i) > 1001) Then a = 0
'   a = 10 ^ (0.1 * (Lo(i)) - 12)
'   s = s + a
' Next i
' Leq = Round((((10 * (Log(s)) / (Log(10))) + 120)), 0)

Next v

```

'Calcular e registar o número de veículos e o débito numa dada posição (funcionalidade desactivada)

```

' For kp = 0 To 100
' For v = 1 To n
'   If (pos_veículo(v) >= 150 + kp And pos_veículo(v) <= 200 + kp) Then
'     nv = nv + 1
'     vm = vm + vel_veículo(v)
'   End If
'   If (pos_veículo(v) >= 175 + kp And pos_veículo(v) - vel_veículo(v) <= 175 + kp)
Then
'     velv = (vel_veículo(v)) * 15
'     Grid1.Col = kp + 1
'     Grid1.Row = segundos
'     Grid1.Text = velv
'   End If
' Next v
' If vel_veículo(v) <> velv Then
'   If nv > 0 Then velm = FormatNumber(Round((vm / nv) * 15, 2))
'   If nv > 0 Then Q = nv * velm
'   Grid3.Col = kp + 1
'   Grid3.Row = segundos
'   Grid3.Text = Q
' End If
' nv = 0
' vm = 0
' velv = 0
' Next kp

```

'Cálculo e registo do nível de pressão acústica em cada instante

```

cr = Text19.Text 'Atribuição da posição central
For v = 1 To n
  If (pos_veículo(v) >= cr - 8 And pos_veículo(v) <= cr + 8) Then
    dd = Abs(cr - pos_veículo(v))
    L(v) = Round(10 * ((Log(20329335.23 / (1 + (0.8406 * dd * dd)))) /
(Log(10))), 0)
    soma = soma + 10 ^ (0.1 * L(v))
'   Grid3.Row = segundos
'   Grid3.Col = v
'   Grid3.Text = L(v)
'   End If
Next v
If soma > 0 Then Leq = Round(10 * ((Log(soma)) / (Log(10))), 0)
  Grid1.Row = segundos
  Grid1.Col = 1
  Grid1.Text = Leq
  If soma = 0 Then

```

```
        Grid1.Row = segundos
        Grid1.Col = 1
        Grid1.Text = 55
    End If
' Grid3.Row = segundos + 1
' Grid3.Col = n
```

```
    For v = 1 To n
```

'Pintar veículos na via

```
        If tipo_veículo(v) <> 1 Then
            Picture2.DrawWidth = 4
            Picture2.ForeColor = QBColor(8)
            Picture2.Line (pos_veículo(v) - 100, 200)-(pos_veículo(v), 200)
            Picture2.ForeColor = QBColor(1)
            Picture2.Line (pos_veículo(v), 200)-(pos_veículo(v) + 2, 200)
        End If
        If tipo_veículo(v) = 1 Then
            Picture2.DrawWidth = 3
            Picture2.ForeColor = QBColor(8)
            Picture2.Line (pos_veículo(v) - 100, 100)-(pos_veículo(v), 200)
            Picture2.ForeColor = QBColor(12)
            Picture2.Line (pos_veículo(v), 200)-(pos_veículo(v) + 1, 200)
        End If
    Next v
    Slider1.Enabled = True
    Timer1.Enabled = True
```

'Terminar de percorrer via

```
    If (segundos = Text6.Text Or pos_veículo(n) > 1008) Then
        Timer1.Enabled = False
    End If
```

'Exportar tabela para Excel (3ª exportação desactivada)

```
    cmdExp.Enabled = True
    CmdExp2.Enabled = True
' CmdExp3.Enabled = True
```

```
End Sub
```

Anexo B: Tabelas de dados

Tabela 7 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidades médias.

Intensidade de tráfego	Percentagem de pesados	Ligeiros e pesados		Ligeiros	
		Velocidade Média (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)	Velocidade Média (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)
0,1133	5,8(3) %	7,4806	112,209	7,5770	113,6546
	8,(3) %	7,3338	110,007	7,4582	111,873
	20,8(3) %	6,9129	103,6935	7,1679	107,5189
	32,5 %	6,6548	99,822	7,0060	105,0893
	42,5 %	6,3263	94,8945	6,6232	99,3479
0,0567	4,1(6) %	7,7197	115,7955	7,7967	116,9508
	8,(3) %	7,5333	112,9995	7,6756	115,134
	19,1(6) %	7,1489	107,2335	7,4367	111,5501
	33,(3) %	6,9254	103,881	7,4235	111,352
	43,(3) %	6,6701	100,0515	7,2310	108,4654
0,0283	3,(3) %	7,7697	116,5455	7,8334	117,5005
	10,8(3) %	7,5383	113,0745	7,7325	115,9879
	20,8(3) %	7,2829	109,2435	7,6355	114,5332
	33,(3) %	6,9268	103,902	7,4087	111,1306
	35,8(3) %	6,8633	102,9495	7,3796	110,6944
0,0142	5,8(3) %	7,7469	116,2035	7,8582	117,8737
	10 %	7,6142	114,213	7,7982	116,9734
	22,5 %	7,3297	109,9455	7,7332	115,9974
	32,5 %	7,1081	106,6215	7,6666	114,9991
	41,(6) %	6,8829	103,2435	7,5567	113,3502

Tabela 8 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidade média do trajecto.

Intensidade de tráfego	Percentagem de pesados	Velocidade Média (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)	Desvio – padrão	Coefficiente de assimetria	Coefficiente de “achatamento”
0,1133	5,8(3) %	7,4806	112,209	0,6201	1,4240	0,8651
	8,(3) %	7,3338	110,007	0,7022	0,9836	- 0,5434
	20,8(3) %	6,9129	103,6935	0,8277	- 0,092	- 1,6797
	32,5 %	6,6548	99,822	0,7493	- 0,5165	- 1,2820
	42,5 %	6,3263	94,8945	0,6273	- 1,5101	0,9720
0,0567	4,1(6) %	7,7197	115,7955	0,5179	2,6200	5,6081
	8,(3) %	7,5333	112,9995	0,6601	1,5910	0,9502
	19,1(6) %	7,1489	107,2335	0,8560	0,4298	- 1,5964
	33,(3) %	6,9254	103,881	0,8779	0,0332	- 1,7689
	43,(3) %	6,6701	100,0515	0,8259	- 0,4880	- 1,4866
0,0283	3,(3) %	7,7697	116,5455	0,4233	3,4935	11,9517
	10,8(3) %	7,5383	113,0745	0,6785	1,5890	0,9768
	20,8(3) %	7,2829	109,2435	0,8222	0,8216	- 1,0900
	33,(3) %	6,9268	103,902	0,8730	0,0028	- 1,8244
	35,8(3) %	6,8633	102,9495	0,8810	- 0,1306	- 1,7659

0,0142	5,8(3) %	7,7469	116,2035	0,4707	3,2042	9,4622
	10 %	7,6142	114,213	0,6122	2,0833	2,8169
	22,5 %	7,3297	109,9455	0,8186	0,9463	- 0,8818
	32,5 %	7,1081	106,6215	0,9184	0,3903	- 1,7535
	41,(6) %	6,8829	103,2435	0,8983	- 0,0272	- 1,8492

Tabela 9 – Relação entre intensidade de tráfego, percentagem de pesados e velocidade média do trajecto.

Intensidade de tráfego	Percentagem de pesados	Velocidade Média (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)	Desvio – padrão	Coefficiente de assimetria	Coefficiente de “achatamento”
0,1133	65 %	6,1003	91,5045	0,4070	- 2,4303	5,7533
	81,(6) %	6,0023	90,0345	0,1811	- 3,3093	13,4397
0,0567	55,8(3) %	6,4265	96,3975	0,7345	- 1,181	- 0,2948
	85,8(3) %	6,0481	90,7215	0,3304	- 3,7561	14,7614
0,0283	63,(3) %	6,3983	95,9745	0,7553	- 1,2569	- 0,1715
	83,(3) %	6,1508	92,262	0,5755	- 2,4712	4,4900
0,0142	56,(6) %	6,6635	99,9525	0,9117	- 0,5167	- 1,6230
	80 %	6,2567	93,8505	0,6742	- 1,8080	1,5270

Tabela 10 – Relação entre intensidade de tráfego, o parâmetro de instabilidade e a percentagem de pesados.

Intensidade de tráfego	Parâmetro de instabilidade	Percentagem de pesados	Velocidade Média dos veículos ligeiros (n.º de células por unidade de tempo)	Velocidade Média (km/h)
0,1133	0,1	28%	7,0494	105,741
	0,25	32%	6,9828	104,742
	0,75	32%	6,4398	96,597
	0,8	33%	6,4351	96,5265
	0,85	32%	5,4392	81,588
	0,9	25%	3,6592	54,888
	0,1	11%	7,4418	111,627
	0,25	12%	7,4057	111,0855
	0,75	12%	7,2322	108,483
	0,8	11%	6,5339	98,0085
	0,85	8%	6,3023	94,5345
	0,9	9%	4,6159	69,2385

