

## MODELO DE PREVISÃO DE RUÍDO EM VIAS DE TRAFEGO INTENSO

Manuel Matos<sup>1,2</sup>, Marta Catarino<sup>1</sup>, Hugo Silva<sup>1,3</sup>, Nelson Silva<sup>1,3</sup>, Cristina M. Oliveira<sup>3</sup>, Maria T. Santos<sup>1</sup>, Jacob Matos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISEL-Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>IT-Instituto de Telecomunicações, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>CQEI, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

{manuel.matos@iscl.pt, A37103@alunos.iscl.pt, hugo.felix.silva@iscl.pt, nelson.silva@iscl.pt, cmoliveira@fc.ul.pt, tsantos@deq.iscl.ipl.pt, jacobtmatos@g }

### Resumo

O ruído proveniente de tráfego rodoviário constitui a maior fonte de poluição sonora na Europa. Estima-se que cerca de 100 milhões de pessoas sejam afetadas por níveis prejudiciais de ruído rodoviário. Na cidade de Lisboa, a 2ª Circular atravessa a cidade na sua coroa norte, ligando os principais nós rodoviários da cidade. É a via com maior volume de tráfego na cidade estimando-se que seja percorrida, em média, por 105 mil veículos por dia. Esta via-rápida urbana atravessa zonas residenciais, empresariais e também zonas com escolas e hospitais. O seu impacto sonoro é importante nos habitantes e trabalhadores na sua vizinhança.

Numa campanha de monitorização de ruído na 2ª Circular, verificou-se que o nível de ruído mínimo nunca desceu abaixo dos 65 dB, enquanto o nível máximo pode atingir os 72 dB. Estes níveis de ruído estão diretamente correlacionados com o número, tipo e velocidade dos veículos que circulam na via. Através dos dados recolhidos foi construído um modelo relacional entre o ruído e o número, tipo e velocidade dos veículos circulantes bem como a sua relação com os poluentes emitidos.

**Palavras-chave:** ruído, tráfego automóvel, poluição ambiental, Lisboa.

### Abstract

Noise from road traffic is the biggest source of noise pollution in Europe. It is estimated that around 100 million people are affected by harmful levels of road noise. In the city of Lisbon, the 2nd Circular crosses the city in its northern crown, connecting the main road nodes. It is the road with the highest traffic volume in the city and it is estimated that circulate there, on average, by 105 thousand vehicles per day. This urban highway crosses residential areas, businesses and also areas with schools and hospitals. Its sound impact is important for the inhabitants and workers in its neighborhood.

In a noise monitoring campaign in the 2nd Circular, it was found that the minimum noise level never dropped below 65 dB, while the maximum level can reach 72 dB. These noise levels are directly correlated with the number, type and speed of vehicles traveling on the road.

Through the data collected, a relational model was built between noise and the number, type and speed of circulating vehicles, as well as their relationship with the pollutants emitted.

**Keywords:** noise, car traffic, environmental pollution, Lisbon.

**PACS no. 43.20-ad.**

## 1 Introdução

A principal fonte de poluição sonora nas áreas urbanas é geralmente o tráfego rodoviário. O ruído proveniente de ferrovias e aeronaves tem um impacto muito menor em termos de exposição global ao ruído da população [1].

O ruído proveniente de tráfego rodoviário é causado pela combinação de ruído de rolamento e ruído de propulsão. O ruído de rolamento tem a sua origem na interação entre o pneu do veículo e o asfalto bem como os ruídos aerodinâmicos. O ruído de propulsão inclui o motor, os sistemas de exaustão, de admissão e de transmissão. Estima-se que acima de uma velocidade de 40 km/h, para a maioria dos automóveis, e acima de 70 km/h, para camiões, o ruído de rolamento constitui a principal fonte de ruído do tráfego rodoviário. Abaixo dessas velocidades, a principal fonte de ruído do tráfego rodoviário é o ruído de propulsão. Os veículos que mais contribuem para o ruído proveniente de tráfego rodoviário são, segundo a Agência Europeia de Ambiente [2] os automóveis de passageiros e os camiões. Também segundo dados desta agência, o ruído ambiente é responsável pela morte prematura de, pelo menos 10 mil pessoas por ano na Europa [3]. Todos os anos são admitidos nos hospitais europeus mais de 43 mil pessoas por doenças relacionadas com a poluição sonora e 900 mil casos de hipertensão por ano são atribuídos ao ruído ambiental. Menos graves mas também muito impactantes, são os mais de 8 milhões de adultos que sofrem de distúrbios de sono associados ao ruído. A Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou as últimas diretrizes para a Europa em matéria de ruído, alertando para o excesso continuado de ruído em ambientes urbanos que provocam alterações no sono, problemas cardiovasculares, condutas agressivas, maior risco de obesidade abdominal ou diabetes, hipertensão, dificuldades de aprendizagem e de atenção entre os mais jovens, para além de afetar a saúde mental, o metabolismo e, claro, a qualidade de vida como um todo [4]. Os efeitos da exposição ao ruído ambiental podem variar de emocionais para fisiológicos e psicológicos [5]. Relativamente aos efeitos fisiológicos, verifica-se que o ruído lesa não só o sistema auditivo, mas também as diferentes funções orgânicas. Deste modo, contribui para distúrbios gastrointestinais e distúrbio relacionados com o sistema nervoso central. Podem também alterar o equilíbrio psicológico. Um local de trabalho ruidoso concorre no sentido de aumentar as tensões a que um indivíduo está sujeito nesse local.

O efeito mais notável do ruído no corpo humano é a perda de audição. Este é um processo gradual em que as pessoas costumam tomar gradual consciência do dano. Este efeito é sentido em grande parte devido a exposição a ruído ocupacional. O ruído como fator de risco ocupacional é desde há muito tempo estudado, tendo sido investigado amplamente a sua influência na saúde e segurança dos trabalhadores [6]. As perdas de audição são função da frequência e da intensidade do ruído, sendo mais evidentes para os sons puros e para frequências elevadas. A fadiga auditiva traduz-se por um abaixamento reversível da acuidade auditiva e é determinado pelo grau de perda de audição e pelo tempo que o ouvido demora a retomar a audição inicial. Pode ser considerada uma medida indireta de admissibilidade face ao ruído, implicando a fixação de um limite de perda de audição após a exposição [7]. Quando a exposição a ruído excessivo se mantém durante um longo período de tempo, surge um défice permanente de acuidade auditiva. Inicia-se, então, um processo de destruição das células ciliadas do órgão de Corti. O défice forma-se para além das frequências de conversação, não sendo, por isso, detetado na atividade do dia a dia. A audição humana considera-se diminuída quando a média aritmética dos limiares tonais permanentes para as frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz for igual ou superior a 25 dB, relativamente ao zero audiométrico de referência obtido a partir da norma NP EN ISO 389 – 1: 2007.

A perda auditiva não tem cura, havendo apenas espaço para a prevenção e dado o impacto que tem em contexto laboral e no dia-a-dia dos trabalhadores é de prever que a grande maioria dos estudos publicados acerca desta temática, abordem o ruído em contexto laboral quando a exposição é elevada e a níveis considerados perigosos, sendo que segundo a legislação portuguesa constituem risco de perda auditiva, exposições acima de 80 dB (A), 8 horas por dia, 5 dias por semana, não havendo no entanto

qualquer referência para os efeitos psicofisiológicos aquando de exposições a níveis de pressão sonora inferiores [8].

A medição do ruído é realizada por sonómetros calibrados mas o seu custo de aquisição e de calibração tem provocado uma procura de alternativas para a medição e avaliação do ruído. Neste campo os *smartphones* tornaram-se ferramentas privilegiadas do público para a realização desta função. Tornou-se também comum os profissionais de acústica utilizarem os seus *smartphones* para alguns tipos de caracterização do campo sonoro. Está claro que, atualmente, dificilmente um *smartphone* será um sonómetro homologado mas por outro lado já é uma ferramenta ágil para a caracterização de alguns parâmetros acústicos, como seja por exemplo a identificação de uma frequência de um som e da sua intensidade. A conjugação do hardware dos smartphones (capacidade de cálculo, armazenamento, comunicações e presença de um ou mais microfones) com aplicações móveis são fatores para a crescente utilização destes dispositivos para avaliar o nível sonoro. Os utilizadores podem usar os seus *smartphones* para relatar os níveis de ruído e geolocalização do mesmo usando o áudio e GPS dos dispositivos (sistema de posicionamento global) para mapear níveis de ruído em cidades ou classificar restaurantes e locais de entretenimento com base no ruído ambiente [9]. Embora os *smartphones Android* dominem a participação no mercado mundial, o iOS continua a ser a plataforma de desenvolvimento preferida para aplicações de medição de áudio e de som. Isto deve-se principalmente ao facto de todos os dispositivos móveis iOS compartilharem uma arquitetura de áudio comum chamada *Core Audio* e porque normalmente não há mais de 15 variações atuais de dispositivos móveis iOS (incluindo variantes com tamanho de ecrã diferente) com 86% executando a versão mais recente do iOS e 97% desses dispositivos executando um iOS que não tem mais de dois anos. Em contraste, o mercado do *Android* é muito mais fragmentado, com muitos fabricantes diferentes produzindo um grande número de dispositivos móveis que vão desde dispositivos menos potentes, de baixo custo a poderosos e de alta qualidade. Muitas vezes os componentes são oriundos de fornecedores diferentes para microfones e áudio, ferramentas de processamento e *chipsets*, além disso, apenas 11,5% dos dispositivos *Android* executam a versão mais recente do *Android* [9].

Há apenas um pequeno número de estudos que investigaram questões relevantes para o estudo apresentado [10]. Num teste a 10 aplicações iOS e 4 aplicações *Android* para medição de ruído em âmbito ocupacional em 8 *smartphones* e um *tablet*, a aplicação de ruído do iOS – *SoundMeter*, desenvolvido pela *Faber Acoustical* - tem a melhor concordância em níveis ponderados A (-0,52), com valores de referência, enquanto outras três aplicações para o iOS estavam dentro de  $\pm 2$  dB (A) relativamente aos valores de referência. Este estudo conclui que os dispositivos que executam o iOS possuem um maior potencial para serem utilizados como dispositivos de avaliação em ambientes ocupacionais. Os dispositivos que correm o sistema operacional *Android* são menos adequados porque geralmente, os componentes têm origem muito diversificada e apresentam uma falta de conformidade [10]. Neste estudo testaram-se 100 telefones móveis (modelos e sistemas operativos diferentes) com várias aplicações de medição de som [11]. Os resultados mostram que, em média, o nível medido apresenta um erro de 2,93 dB(A) em dispositivos iOS e 2,79 dB(A) em dispositivos *Android*. Aumond *et al.* (2017) examinaram também a precisão dos dispositivos móveis para medir a poluição sonora urbana. Realizaram um total de 3409 medições de ruído usando 60 telefones celulares em 28 locais selecionados em Paris, em paralelo com estações fixas de monitorização de ruído e um sonómetro. Ao processar a abundância de dados de ruído reunidos por 60 participantes, atenuaram o efeito da variabilidade entre dispositivos e concluíram que os telefones móveis poderiam ser uma ferramenta útil de medição de ruído. Embora o estudo tenha sido realizado apenas em dispositivos baseados no sistema operativo *Android* (HTC-One X), demonstraram que os níveis de ruído medidos com telefones móveis se correlacionam fortemente com a estação de monitorização de ruído e medições do sonómetro apresentando os dados um erro menor que 3 dB(A).

A questão mais importante com o uso de smartphones e aplicações de medição de som até hoje é que nenhum deles cumpre com os padrões internacionais de sonómetro, como a norma internacional IEC 61672-1: 2013 e, como resultado, não podem ser utilizados para fazer monitorizações de ruído

ambiente ou ocupacional regulamentadas. Apenas são usados como valores indicativos de uso pessoal ou para ID. Para abordar esta questão, um estudo recente [12] submeteu um sistema de medição de nível de ruído, que consiste numa aplicação de medição de ruído em dispositivos iOS aos quais se acoplou um microfone externo, compatível com a Classe 2 do padrão IEC 61672. Concluindo, ao executar uma calibração de nível profissional, que a entrada de áudio de um smartphone tem um bom desempenho, e os resultados da maioria dos testes estão dentro dos limites da Classe 2 do padrão IEC. Concluiu-se que o medidor de nível de som baseado de uma aplicação tem um bom desempenho, dado que um microfone de medição externo é utilizado e mostra potencial para ser usado como um dispositivo de medição adequado (artigo microfones). Esta foi a solução que adotámos para algumas das medidas deste estudo por se revelar o conjunto de hardware e software com um desempenho bastante estável e aceitável.

O estudo apresentado enquadra-se na monitorização do ruído em ambiente urbano pois este é um problema sério e permanentemente omnipresente em muitas cidades da Europa e do mundo. A união Europeia financiou o *NoiseTube* [13], um projeto de pesquisa iniciado em 2008 no *Sony Computer Science Lab*, em Paris, e atualmente a sua gestão é feita pelo *Software Languages Lab* na *Vrije Universiteit Brussel*. O projeto *NoiseTube* implementou uma abordagem participativa para monitorizar a poluição sonora, envolvendo o público em geral. A aplicação móvel *NoiseTube* amplia o uso atual de telefones móveis transformando-os em sensores de ruído, permitindo que os cidadãos meçam a exposição do som no ambiente quotidiano. Além disso, cada utilizador pode participar da criação de um mapa coletivo de poluição sonora ao partilhar os dados de medição geolocalizados com a comunidade *NoiseTube*. A aplicação é gratuita e é possível medir o nível de ruído em dB(A) e marcar as medidas obtidas. Quando carregado para o site (através de rede móvel, Wi-Fi ou manualmente), é possível verificar a trajetória do som suas medições no *Google Maps*. Esta foi uma aplicação também usada neste estudo.

Estes projetos participativos envolvendo a comunidade são bastante importantes como veículos de conhecimento e sensibilização do público em geral pois estima-se que cerca de 108 milhões de pessoas nos países membros da UE estão expostas a níveis de ruído  $L_{den}$  (exposição média anual ao indicador de ruído diurno, entardecer e noturno) do tráfego rodoviário que são iguais ou superiores a 55 dB. Destes, 34 milhões estão expostos a níveis muito elevados de ruído de pelo menos 65 dB  $L_{den}$ . Mesmo com a participação massiva dos cidadãos não é possível medir o ruído em todas as ruas de todas as cidades, em todas as grandes vias de tráfego automóvel e rodoviário. Para cobrir grandes zonas, os mapas de ruído são produzidos por software de simulação baseado em dados reais [14]. Esta foi também uma componente deste trabalho que para além dos dados reais se ajustou estes dados ao modelo mais utilizado na EU, o modelo HARMONOISE. Outros modelos existem e os modelos mais utilizados para avaliação da exposição a ruídos, em conjunto com a poluição do ar, são o SoundPLAN, o CadnaA e o TRANEX. O SoundPLAN é indicado como o principal software de previsão de ruído ambiente. É um pacote de software comercial que oferece módulos de simulação de alto nível para cálculos de poluição atmosférica e sonora. Para calcular o ruído do tráfego rodoviário, vários métodos de modelação europeus são implementados no SoundPLAN, incluindo, por exemplo, o modelo francês, NMPB2008, alemão, RLS 90 e vários métodos nórdicos: RTN 96 e Nord2000. Khan et al. (2018) usaram o SoundPLAN para avaliar os efeitos da exposição ao ruído do tráfego na saúde humana na Dinamarca [15].

O projeto HARMONOISE insere-se na intenção da Comissão Europeia para estabelecer métodos de avaliação comuns para a produção de mapas de ruído. O projeto HARMONOISE pretende desenvolver e validar métodos para a Avaliação e Gestão do Ruído do Tráfego Rodoviário e Ferroviário. O principal objetivo foi estabelecer métodos harmonizados, precisos e fidedignos entre os futuros utilizadores em toda a UE. Os métodos a fornecer seriam implementados como obrigatórios pelos estados membros e iriam de encontro a uma ampla utilização para fins de planeamento, mapeamento, zoneamento, medidas e estratégias de redução do ruído e para verificações de conformidade [16]. No projeto HARMONOISE, é dada ênfase ao desenvolvimento da definição

completa da emissão do veículo rodoviário europeu médio em bandas de 1/3 de oitava. O modelo de emissões de ruído rodoviário descreve as emissões sonoras de um veículo rodoviário europeu "médio" em termos de potência sonora. O modelo consiste em um conjunto de equações matemáticas representando as duas principais fontes de ruído:

1. Ruído de rolamento devido à interação pneu / estrada;
2. Ruído de propulsão produzido pela transmissão (motor, escape, etc.) do veículo.

As fórmulas matemáticas exibem a forma geral apresentada na equação (1) que nos devolve o nível de potência sonora  $L_{i,m}$ :

$$L_{i,m}(v, a) = A_{i,m} + B_{i,m} \cdot f(v) \quad (1)$$

Onde:

$A_{i,m}$  representa o ruído de rolamento e de propulsão do veículo rodoviário à velocidade de referência de 70 km / h

$B_{i,m} \cdot f(v)$  representa a mudança na produção de ruído devido a uma diferença na velocidade do veículo em relação a uma velocidade de referência em que  $f(v)$  é uma função logarítmica da velocidade do veículo  $v$  no caso de ruído de rolamento e aerodinâmico, e uma função linear com  $v$  no caso de ruído de propulsão.

O nível de potência sonora  $L_{i,m}$  é calculado em 1/3 de oitavas de 25 Hz a 10 kHz, onde o índice  $i$  indica a banda de frequência espectral. O índice  $m$  representa o tipo de veículo.

O modelo desenvolvido baseia-se nas seguintes premissas:

- Cada veículo rodoviário tem dois tipos de fontes de ruído, um para o ruído de rolamento e outro para o ruído do sistema de propulsão;
- As diferenças entre as características de emissão sonora dos veículos rodoviários são distinguidas através de categorias de veículos;
- O efeito da superfície da estrada é implementado no ruído de rolamento e no nível de ruído de propulsão;
- O efeito do comportamento de condução (velocidade e aceleração) é tido em conta na formulação da força de fonte para propulsão e ruído de rolamento.

No desenvolvimento do projeto HARMONOISE, foi demonstrado como os níveis de ruído são influenciados por condições meteorológicas como a velocidade e direção do vento e efeitos de inversão térmica. Para a determinação dos níveis médios de ruído a longo prazo, os níveis de curto prazo, válidos sob condições meteorológicas específicas, devem ser ponderados de acordo com sua frequência de ocorrência.

O tipo de superfície da estrada também influencia significativamente a produção de ruído de um veículo. São registadas diferenças de até 15 dB (A) para o mesmo veículo e velocidade. A superfície da estrada afeta principalmente o nível de ruído de rolamento, mas superfícies porosas e de absorção sonora também afetam o ruído de propulsão.

## 2 Caso de estudo – 2ª Circular em Lisboa

Para o caso de estudo foi selecionada uma via de tráfego rodoviário intenso com mais de 3 milhões passagens/ano, a designada 2ª Circular em Lisboa. Atualmente, a Segunda Circular atravessa a cidade de Lisboa na sua coroa norte, ligando (a poente) o nó rodoviário entre a CRIL e o IC19 ao nó rodoviário (a nascente) entre a A1, a CRIL e a Ponte Vasco da Gama. A sua extensão total é cerca de 10 km. Esta via encontra-se frequentemente congestionada, tem funções desadequadas e alguns dos troços estão em mau estado de conservação.

Consultando os volumes de tráfego na rede de Lisboa, [17] verifica-se que a 2ª Circular é, claramente, o eixo municipal com maior volume de tráfego da cidade, equiparando-se a vias de grande importância

regional, como são os casos do IC19, Ponte 25 de Abril ou A5. Segundo o estudo para a sua remodelação [17] a 2ª Circular apresentava um tráfego médio diário de 105.000 veículos nos dois sentidos. Apesar de a velocidade máxima permitida ser 80 km/h, a velocidade média em hora de ponta é de 45,7 km/h, fruto de um rácio volume / capacidade acima de 90%.

O local de recolha de dados situou-se na ponte pedonal da 2ª circular, junto ao Colégio Alemão (Figuras 1 e 2). O troço entre a Azinhaga das Galhardas e a Rotunda do Relógio, no qual se inclui o local de estudo, apresenta volumes de tráfego muito próximos dos 130.000 veículos/dia nos dois sentidos. Trata-se assim de uma zona bastante representativa desta importante via de circulação da cidade de Lisboa. No local escolhido foi feita a monitorização do tráfego nos dois sentidos: sentido M1 (Campo Grande – Benfica) e sentido M2 (Benfica – Campo Grande)

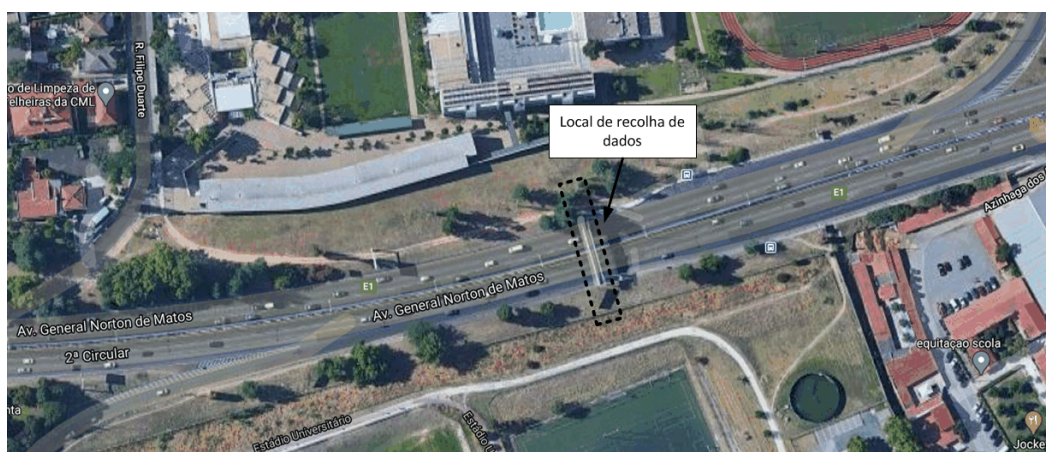


Figura 1 -Zona de recolha de dados. (Adaptado de *Google Maps*, 2020)



Figura 2 – Ponte pedonal utilizada na recolha de dados.

### 3 Metodologia

A metodologia aplicada no presente trabalho é aqui sistematizada nos seguintes passos:

- Recolha de dados de imagem (vídeo e fotografias) em simultâneo com a recolha de dados de som e da gravação do som;
- Tratamento dos dados de vídeo (contagem de veículos de cada classe e cálculo de velocidades dos mesmos);
- Tratamento dos dados de som e identificação de eventos sonoros;
- Desenvolvimento de matriz de correlação multilinear com o *software* SPSS *Statistics*, v.22 [18];
- Ajuste dos dados ao modelo de ruído através de rotina escrita em R [19].

A recolha de dados de imagem e som foi realizada através de telemóveis (*iPhone 6 Plus* e *iPhone 6*), para captura de som e câmaras de vídeo (Nikon), para captura de imagem, colocados na ponte pedonal sobre a 2ª Circular. Os telefones tinham acoplados microfones externos da marca iMM-6 referenciados como possuindo boa qualidade no estudo de Kardous [12] e com a aplicação NoiseTube [13].

Os dados de som, ficheiros de dados com a extensão .json e provenientes da aplicação NoiseTube, foram convertidos para dados numéricos, a tratar em Microsoft Excel, com recurso ao website <https://json-csv.com>. Em simultâneo, foi feita a contagem manual do número de viaturas com recurso a imagens vídeo para os dois sentidos de tráfego para cruzar com os dados de som. Com o auxílio do *software* VLC (Videolan, 2018) e a a extensão *Time* (addons.Videolan, 2018) foi possível calcular o tempo que cada veículo demorava entre pontos de referência cuja distância foi medida previamente. Deste modo foi calculada a velocidade média para um veículo em cada intervalo de 20 segundos para todas as faixas de rodagem, em ambos os sentidos.

Para o desenvolvimento do modelo de nível de ruído em função da velocidade e quantidade de veículos, foi utilizado o RStudio, software gratuito de tratamento estatístico de dados. O modelo construído baseia-se na expressão do modelo IMAGINE em função da velocidade e quantidade de veículos. O nível de aceitação do modelo obtido foi definido pelos resíduos dos dados reais versus dados simulados.

### 4 Resultados e discussão

Na figura 3 apresenta-se os dados recolhidos numa sexta-feira do mês de maio de 2018. Verifica-se que os valores de maior volume de tráfego se registam entre as 08:00 e as 09:16 h. Estes volumes de tráfego podem ser explicados pelo facto de a segunda circular ser uma via utilizada pelos cidadãos que se deslocam de e para o emprego. Registam-se dados elevados no intervalo que se inicia às 11:52. Pode ser explicado pelo facto de cidadãos se deslocarem à hora de almoço. São registados níveis de ruído entre os 68 dB(A) e os 72 dB(A). Os dados mostram também uma aparente correlação inversa entre o número de veículos, a sua velocidade e o ruído produzido. Para os restantes dias os dados apresentaram um perfil idêntico tendo sido considerada a média de três dias (segunda, terça e sexta-feira) para o ajuste do modelo HARMONOISE.

Ao desenvolver a matriz de correlação é possível identificar um *cluster* de correlação significativa entre o ruído e a velocidade média dos veículos. Quando se avalia a correlação entre o som e as velocidades dos diferentes tipos de veículos obtemos a correlação mais significativa para os veículos pesado (cerca de 10% mais que para os veículos ligeiros). De referir que tratamento dos dados foi feito no SPSS *Statistics*.



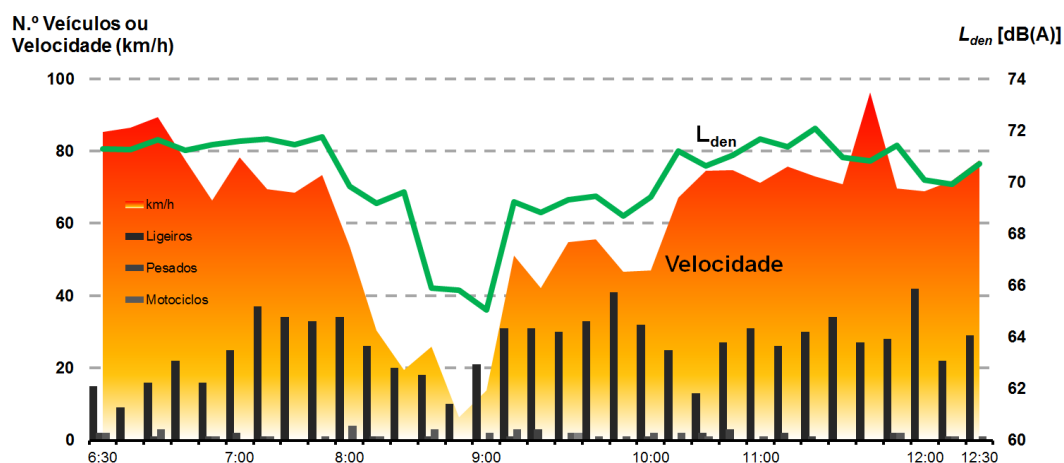


Figura 3 – Número de veículos (ligeiros, pesados e motociclos), velocidade média e ruído registado numa manhã de monitorização.

Os dados reais de ruído foram utilizados para encontrar um modelo de ajuste capaz de simular as emissões sonoras em função das velocidades e quantidades de veículos que passam na via. O ajuste do modelo foi desenvolvido recorrendo ao *software* RStudio em que se considerou que a equação (1) pode ser transformada na equação genérica (2) ou, detalhando mais cada fator, na equação (3).

$$\hat{y} = a + b \ln x \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 X + e \quad (3)$$

A expressão (3) pode ser considerada uma equação de regressão linear do tipo regressão múltipla populacional explicitando-se como mostrado na equação (4).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e \quad (4)$$

Onde:

$$X_1 = \log Q \text{ e } X_2 = \log v$$

O resultado de ajuste de dados é traduzido pela equação (5) com significância estatística para  $p\text{-value} = 1.017 \times 10^{-11}$ .

$$\hat{y} = 59.2884 + 0.6015X_1 + 5.6552X_2 \quad (5)$$

Ao testar a rejeição dos coeficientes de regressão, verificou-se que a quantidade de veículos ( $X_1$ ) revelou pouco peso no modelo de regressão linear.

O melhor modelo, através de regressão *Stepwise* é traduzido pela equação (6).

$$\hat{y} = 60.162 + 5.638X_2 \quad (6)$$

Foi esta a equação usada para realizar a simulação mostrada na figura 4.

Destacam-se dois pontos do som medido pelos dispositivos, de cerca de 68 dB(A). O primeiro desvio relativamente ao som simulado é justificado pelo fluxo de tráfego reduzido. Já o segundo desvio caracteriza-se exatamente pelo oposto, ou seja, os veículos deslocam-se em marcha lenta devido ao congestionamento.



A correlação entre os dados reais e os dados simulados de acordo com o modelo HARMONOISE revela-se bastante aceitável como se observa na figura 4. Verifica-se uma elevada conformidade entre dados reais e simulados apesar da existência de maiores resíduos em segmentos onde o tráfego é menos constante. Os valores divergentes entre nível real e simulado, no período compreendido entre as 08:04 e as 08:34 são explicados pelo facto de o tráfego se encontrar congestionado com uma velocidade muito baixa de escoamento.

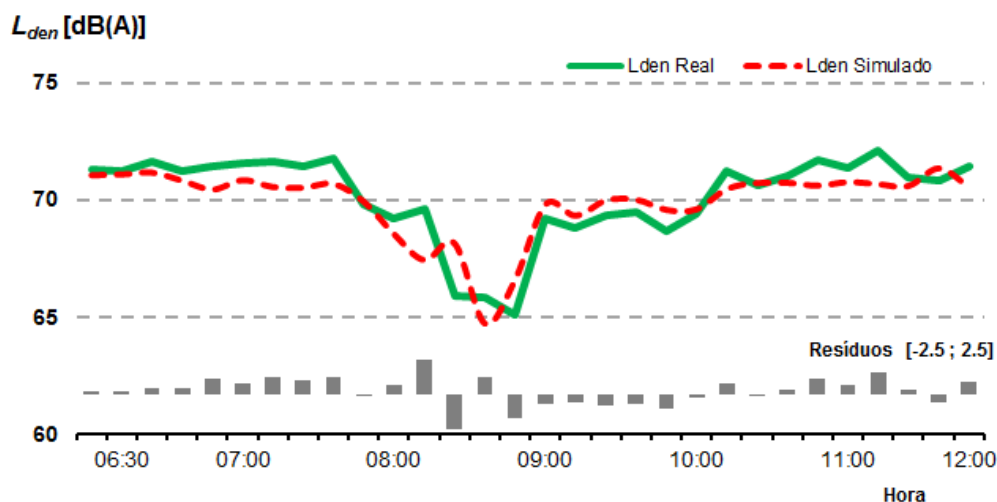


Figura 4 – Correlação entre os dados reais e dados simulados pelo modelo HARMONOISE.

## 5 Conclusões

É notável a convergência da tendência e dos valores entre os níveis reais e simulados, exceto no período compreendido entre as 08:04 e as 08:34, já discutido. Como também foi concluído no desenvolvimento do modelo HARMONOISE, a velocidade não é um parâmetro linear e é efetivamente um parâmetro complexo. Determina as rotações do motor, e respetivo ruído, mas também o ruído associado ao rolamento e à aerodinâmica. O número de veículos revelou explicar pouca variância no modelo aplicado a este caso concreto de um segmento da 2ª Circular em Lisboa. Haverá, no entanto, que ter a precaução de assumir a validade do modelo nesta forma simplificada (sem componente de fluxo de veículos) é de aplicação particular a este caso concreto. Noutras situações de tráfego o modelo deverá ser efetivamente reavaliado na sua forma originalmente proposta.

Os valores de ruído registados são de facto, elevados em certos momentos e apresentando-se a 2ª Circular uma das vias mais movimentadas de Portugal, devem ser seriamente considerados os seguintes pontos:

- Nos edifícios vizinhos deverão ser implementados isolamentos de ruído;
- Deve ser evitada a construção de edifícios como escolas e hospitais nas zonas vizinhas muito ruidosas como são as imediações da 2ª circular;
- Deveria ser equacionada a criação de uma barreira verde para a contenção de ruído e poluentes em toda a zona da 2ª Circular.

Em relação às perspetivas a longo prazo para a exposição ao ruído ambiental na Europa, existem uma série de desafios para reduzir a exposição da população à poluição sonora. O crescimento económico e a expansão das redes de transporte podem levar a um aumento dos níveis de transporte, o que pode,

por sua vez, aumentar a poluição sonora do mesmo modo que as tendências para o aumento da urbanização [20] podem levar a um maior número de pessoas expostas. A procura de transporte, incluindo automóveis de passageiros, deverá aumentar até 2050 [21], o que contribuirá para que o ruído do tráfego rodoviário continue a fonte predominante de ruído ambiental. A progressiva substituição dos veículos de combustão por veículos híbridos e elétricos poderá implicar um notório abaixamento dos níveis de ruído mas teremos sempre as componentes de ruído do rolamento e aerodinâmicas. Também a nova regulamentação da UE sobre os níveis de ruído dos veículos motorizados exige a instalação de geradores de som artificial em todos os veículos elétricos e híbridos para melhorar a segurança dos peões o que poderá atenuar a esperada diminuição de ruído nas cidades. O futuro que caminhava para a crescente utilização dos transportes públicos nas cidades viu esta trajetória subitamente interrompida. A pandemia relançou a procura do transporte individual que poderá implicar o regresso do tráfego intenso às cidades. Os tempos são de incerteza e os novos modelos estão, de novo, completamente em aberto.

## **Agradecimentos**

À Câmara Municipal de Lisboa que nos isentou das taxas de filmagem em via pública.

## **Referências**

- [1] European Environmental Agency. (2018). Population exposure to environmental noise. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-2>, última visualização a 3 de Agosto de 2020.
- [2] European Environmental Agency. (2014). Noise in Europe 2014. <https://doi.org/10.2800/763331>
- [3] European Environmental Agency. (2017). Managing exposure to noise in Europe. Disponível em [https://www.eea.europa.eu/publications/managing-exposure-to-noise-in-europe/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/managing-exposure-to-noise-in-europe/at_download/file), última visualização a 26 de setembro de 2020.
- [4] OMS. (1999). New Who Guidelines for Community Noise. Noise & Vibration Worldwide. OMS. <https://doi.org/10.1260/0957456001497535>
- [5] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). Fundamentals of Acoustics. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470612439>
- [6] Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2009). Master Handbook of Acoustics. Animal Genetics (Vol. 39). Fifth editions TAB Books.
- [7] Miguel, A. S. S. R. (2014). Manual de higiene e segurança do trabalho. 14ª edição PORTO EDITORA
- [8] Margarida, A. (2018). Perceções sobre o ruído e desempenho de tarefas do quotidiano laboral. Instituto Politécnico de Lisboa - Tese de Mestrado.
- [9] Celestina, M., Hrovat, J., & Kardous, C. A. (2018). Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. Applied Acoustics, 139, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.011>
- [10] Murphy, E., & King, E. A. (2016). Testing the accuracy of smartphones and sound level meter applications for measuring environmental noise. Applied Acoustics, 106, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.012>

- [11] Aumond, P., Lavandier, C., Ribeiro, C., Gonzalez Boix, E., Kambona, K., D'hondt, E., & Delaitre, P. (2017). A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.011>
- [12] Chucri A., Kardous, C.A., Shaw, P.B. (2016) Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones—A follow-up study. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, EL327 (2016); <https://doi.org/10.1121/1.4964639>
- [13] NoiseTube (2008), Sony Computer Science Laboratory Paris & Software Languages Lab. Disponível em <http://www.noisetube.net/index.html#&panel1-1>, última visualização a 26 de outubro de 2018
- [14] Gargab, N., Maji, S. (2014). A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 46, 68-81.
- [15] Khan, J., Ketzel, M., Kakosimos, K., Sørensen, M., & Jensen, S. S. (2018). Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. *Science of the Total Environment*, 634, 661–676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.374>
- [16] CORDIS, IMAGINE Report Summary, 2012. Disponível em [https://cordis.europa.eu/result/rcn/47869\\_en.html](https://cordis.europa.eu/result/rcn/47869_en.html), última visualização a 18 de Abril de 2020
- [17] CML, (2016). Requalificação da Segunda Circular, Projeto de Requalificação da Segunda Circular - 1ª Fase, <http://www.cm-lisboa.pt/viver/urbanismo/outros-projetos-e-obras/projeto-de-requalificacao-da-segunda-circular/antecedentes>, Consultado em 28 de Setembro de 2020.
- [18] IBM Corp. Released 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- [19] R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.r-project.org>.
- [20] Eurostat, Urban Europe - Statistics on cities, towns and suburbs, 2018. Disponível em [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban\\_Europe\\_-\\_statistics\\_on\\_cities,\\_towns\\_and\\_suburbs\\_-\\_the\\_urban\\_paradox](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban_Europe_-_statistics_on_cities,_towns_and_suburbs_-_the_urban_paradox). Última visualização a 3 de Agosto de 2020.
- [21] CE, (2016). EU reference scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions: trends to 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union (<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aed45f8e-63e3-47fb-9440-a0a14370f243/language-en>). Última visualização a 3 de dezembro de 2019.