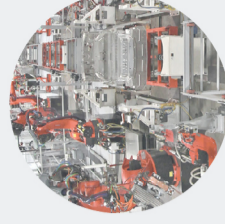
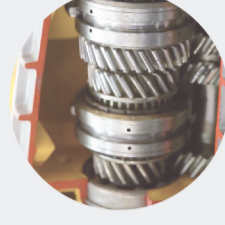
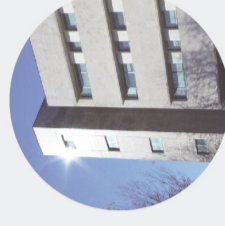
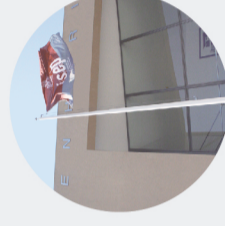




## O impacto do ruído no roteamento de veículos para a logística urbana

**CLÁUDIA SOFIA ELIAS MORAIS PEREIRA**

julho de 2021



## O impacto do ruído no roteamento de veículos para a logística urbana

O impacto do ruído no roteamento de veículos para a logística urbana

CLÁUDIA SOFIA ELIAS MORAIS PEREIRA  
Junho de 2021

CLÁUDIA SOFIA ELIAS MORAIS PEREIRA  
Junho de 2021



# O IMPACTO DO RUÍDO NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A LOGÍSTICA URBANA

Cláudia Sofia Elias Morais Pereira

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

**isen**

**P.PORTO**

## **O IMPACTO DO RUÍDO NO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA A LOGÍSTICA URBANA**

Cláudia Sofia Elias Morais Pereira

Estudante n.º 1180156

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Doutor António Galvão Ramos.

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

**isen**

**P.PORTO**

## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação representa o terminar de um capítulo escolar e pessoal. Foi sem dúvida um grande desafio conseguir conciliar o mundo do trabalho com o da educação, uma vez são realidades muito distintas e ambas bastante exigentes.

Sem dúvida que o COVID-19 marca também este trabalho. Foi um período que nos obrigou a uma rápida adaptação a novas metodologias de trabalho e a aprender a viver numa nova realidade.

Foi um trabalho bastante interessante e enriquecedor e, por isso, o meu primeiro agradecimento é ao meu orientador, Doutor António Galvão Ramos. Obrigada pelo tema que me propôs e por todas as orientações que se relevaram bastante oportunas e essenciais para a realização das várias fases do trabalho.

Aos meus colegas de mestrado, um agradecimento especial por todos os momentos partilhados e por terem sido também os meus companheiros nesta viagem, nos bons e maus momentos.

Não poderia deixar de agradecer, de igual forma, à minha família, pais e irmã, por todo o incentivo e motivação que me deram nos momentos em que estava mais desmotivada e sem rumo, e por poder partilhar com eles a alegria de cada vitória.



## RESUMO

Tendo por base o modelo clássico do VRP, procedeu-se ao desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão, que contempla a inclusão do ruído provocado pelo tráfego rodoviário mais concretamente, pelos veículos de mercadorias, na definição das rotas dos veículos.

Atualmente, o tráfego rodoviário registado nas áreas urbanas resultante da distribuição de mercadoria é bastante intenso. Este tema está diretamente relacionado com o *Vehicle Routing Problem* (VRP), que consiste em determinar a rota mais adequada dos veículos para a realização da distribuição de mercadoria e da satisfação dos pedidos aos clientes. Esta pressão rodoviária provoca problemas de congestionamento nas áreas urbanas, onde geralmente o número de vias e o espaço disponível para a movimentação tende a ser mais limitado, comparativamente com as zonas não urbanas.

Além disso, os veículos pesados de mercadorias emitem níveis de ruído elevados e quando existe uma grande concentração deste tipo de veículos, os níveis de ruído tendem a ser ainda mais elevados e intensos. Assim, estamos perante um problema de elevada importância uma vez que, a exposição a elevados níveis de ruído, superiores ao recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS), provoca efeitos adversos na saúde e no bem-estar dos indivíduos.

O modelo matemático desenvolvido e o modelo clássico foram implementados no software de otimização designado de CPLEX. Tendo por base a área geográfica da cidade do porto, foram geradas 10 instâncias de teste. O ruído foi incluído na função objetivo na forma de custo monetário e verificou-se que, em termos de performance, os dois modelos são bastante similares. Adicionalmente, constatou-se que o custo do ruído representa um custo significativo na definição das rotas e, que influencia as rotas dos veículos.

### PALAVRAS-CHAVE

Logística, Problema do Roteamento de Veículos, Ruído do tráfego urbano, Logística nas cidades, Veículos elétricos



## ABSTRACT

Based on the classical VRP model, a decision support tool was developed considering noise caused by road traffic, more specifically, by goods vehicles, in the definition of vehicle routes.

At present, road traffic registered in urban areas because of the distribution of goods is quite intense. This issue is directly related to the Vehicle Routing Problem (VRP) which consists in determining the most appropriate route for vehicles in the distribution of goods and orders to customers. This road pressure causes congestion problems in urban areas, where generally the number of lanes and the space available for movement tends to be more limited compared to non-urban areas.

In addition, heavy goods vehicles generate high levels of noise and when there is a high concentration of this type of vehicle, noise levels tend to be even higher and more intense. Therefore, this is a very important problem since exposure to high noise levels, higher than recommended by the World Health Organization, causes adverse effects on the health and well-being of individuals.

The mathematical model developed, and the classic model were implemented in the optimization software called CPLEX. Based on the geographic area of the city of Porto, 10 complicated tests were generated. The noise was included in the objective function in the form of monetary cost, and it was found that, in terms of performance, the two models are quite similar. Additionally, it was found that the cost of noise represents a significant cost in the definition of routes and that it influences the routes of vehicles.

## KEYWORDS

Logistics, Vehicle Routing Problem, Urban Traffic Noise, City logistics, Electric Vehicles



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XV
LISTAS DE SIGLAS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO .....	19
1.1. Enquadramento e pertinência .....	19
1.2. Questão e objetivos de investigação.....	21
1.3. Opções metodológicas .....	21
1.4. Estrutura do trabalho .....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Logística Convencional .....	23
2.2. Physical Internet.....	24
2.3. Cross-Docking .....	27
2.4. Problema do Roteamento de Veículos.....	28
2.4.1. Problema do Roteamento de Veículos Verde (GVRP) .....	30
2.4.2. VRP nas áreas urbanas .....	31
2.5. Ruído do tráfego rodoviário .....	33
2.5.1. Características dos veículos ao nível do ruído .....	36
2.5.2. Veículos elétricos leves de carga .....	37
2.5.3. Abordagens do ruído no âmbito do VRP.....	39
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO .....	47
3.1. Descrição do problema.....	47
3.2. Apresentação do caso de estudo .....	48
3.2.1. O ruído no município do Porto .....	50
3.3. Inclusão do ruído no VRP .....	52
3.4. Desenvolvimento do modelo .....	54
3.5. Definição do problema .....	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	65
4.1. Apresentação de resultados.....	65
4.2. Discussão de resultados .....	69
5. CONCLUSÃO .....	73
5.1. Conclusões finais .....	73
5.2. Limitações e investigação futura .....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
ANEXO A .....	80
ANEXO B .....	81
ANEXO C .....	82



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 A rede logística .....	23
Figura 2 Os três principais elementos da <i>Physical Internet</i> .....	25
Figura 3 Interconectividade física e digital na PI.....	26
Figura 4 Representação de um terminal <i>cross-docking</i> .....	27
Figura 5 As partes interessadas da logística nos centros urbanos.....	32
Figura 6 Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e o número de pessoas afetadas .....	34
Figura 7 Capitais na Europa: percentagem de pessoas expostas aos valores de <i>Lnight</i> .....	35
Figura 8 Níveis sonoros por modo de transporte .....	36
Figura 9 Tipos de Veículos elétricos leves de carga .....	38
Figura 10 Modelo proposto para estimar o custo externo do ruído .....	42
Figura 11 Mapa de Portugal e do distrito do Porto .....	48
Figura 12 Evolução do emprego no Porto por setor de atividade .....	48
Figura 13 Evolução do número de empresas e estabelecimentos localizados no Porto .....	49
Figura 14 Mapa de ruído global do município do Porto (período 24h) .....	50
Figura 15 Localização dos hospitais selecionados.....	52
Figura 16 Localização das instituições de ensino selecionadas .....	52
Figura 17 Componentes do modelo do ruído .....	53
Figura 18 Ponto de partida das rotas (Armazém) .....	61
Figura 19 Coordenadas da localização dos clientes .....	62
Figura 20 Localização geográfica dos clientes no município do Porto .....	62
Figura 21 Representação gráfica do custo do ruído .....	64
Figura 22 Pontos Utopia e Nadir - Instância 1.....	71
Figura 23 Resultado da aplicação do método de escalarização.....	72



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Funções e objetivos das partes interessadas .....	33
Tabela 2 Resumo das referências sobre a inclusão do ruído no VRP .....	45
Tabela 3 Cores representativas da classe do nível sonoro .....	51
Tabela 4 Estimativa do número de pessoas expostas (em centenas).....	51
Tabela 5 Preço do ruído do tráfego rodoviário para a EU28 (€2016 /dB/pessoa/ano).....	53
Tabela 6 Parâmetros do modelo desenvolvido.....	55
Tabela 7 Coeficientes do ruído de rolamento.....	80
Tabela 8 Coeficientes do ruído de propulsão .....	81
Tabela 9 Peso bruto e máximo dos veículos .....	60
Tabela 10 Definição do número de clientes por instância .....	61
Tabela 11 Matriz das distâncias (Km) para os clientes da instância 1 .....	62
Tabela 12 Peso das encomendas dos clientes da instância 1 .....	63
Tabela 13 Preço ambiental do ruído rodoviário para a EU28 .....	64
Tabela 14 Resumo da informação das instâncias .....	65
Tabela 15 Resultados obtidos no CPLEX dos dois modelos .....	66
Tabela 16 Rotas obtidas no novo modelo para as 10 instâncias .....	67
Tabela 17 Rotas obtidas no modelo clássico para as 10 instâncias .....	68



---

## LISTAS DE SIGLAS

---

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AEA	Agência Europeia do Ambiente
EFV	Environmentally Friendly Vehicles
EUA	Estados Unidos da América
EUV	Environmentally Unfriendly Vehicles
GVRP	Green Vehicle Routing Problem
IBM	Internacional Business Management
INE	Instituto Nacional de Estatística
IoT	Internet of Things
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LEFV	Light Electric Freight Vehicles
MEGI	Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial
MILP	Mixed Integer Linear Programming
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PIB	Produto Interno Bruto
PI	Physical Internet
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
SEV	Light Electric Vehicle
UE	União Europeia
VRP	Vehicle Routing Problem
WTP	Willingness to pay

---



## 1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo visa introduzir e enquadrar o tema desta dissertação de mestrado que se denomina de “O impacto do ruído no roteamento de veículos para a logística urbana”, no âmbito da dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial (MEGI).

Inicialmente, é exposta toda a informação considerada relevante relacionada com o enquadramento e pertinência do tema, os objetivos estabelecidos, as opções metodológicas, e por fim, uma exposição da organização dos conteúdos.

### 1.1. Enquadramento e pertinência

Neste subcapítulo é apresentado um breve enquadramento do tema abordado no presente trabalho e uma exposição dos principais motivos que justificam a necessidade e o interesse da investigação.

A logística tem um papel muito importante na vida quotidiana dos cidadãos apesar de, muitas das vezes, nem todos terem a perfeita perceção desse facto. É por causa das operações logísticas que, atualmente, é possível ir ao supermercado e encontrar um vasto conjunto de produtos à disposição como por exemplo, fruta de várias partes do mundo a um preço bastante acessível. Mais recentemente, a logística tornou-se também num fator chave para o *e-commerce*, permitindo a realização de compras através da internet, nas quais os produtos chegam à localização do consumidor final a um preço e com um tempo de entrega mais competitivo, quando comparado com os retalhistas tradicionais (Montreuil, Meller, & Ballot, 2012).

No entanto, a forma como os produtos atualmente são produzidos, armazenados e transportados, desde a empresa até ao consumidor final, tem-se revelado um problema devido à insustentabilidade causada em termos económicos, ambientais e sociais (Montreuil, 2011). Do ponto de vista económico, a maneira como os bens fluem ao longo da cadeia de abastecimento tem acarretado custos bastante elevados sendo que, em alguns países desenvolvidos, esses custos representam uma parte significativa do Produto Interno Bruto (PIB). Na perspetiva ambiental, merece destaque o enorme consumo de energia e a emissão de grandes quantidades de gases com efeito de estufa. O que se verifica é que, os produtos são transportados por longas distâncias através de vários meios de transporte (terrestres e aéreos), causando um impacto negativo considerável no meio ambiente. Um dos melhores países para evidenciar esse facto são os Estados Unidos da América (EUA). Em 2016, cerca de 8,8 milhões de camiões percorreram mais de 263 milhões de quilómetros e, em 2017, o transporte efetuado por camião e por comboio consumiu cerca de 42 biliões litros de combustível (Montreuil, 2011).

De uma forma geral, existe um conjunto de situações que conduziram à insustentabilidade da logística atual (Montreuil et al., 2012). A primeira prende-se com o facto de muitas das vezes, a capacidade máxima dos camiões, vagões e contentores não ser totalmente aproveitada. Ou seja, estes iniciam o seu trajeto com muito espaço livre e, no regresso ao ponto de partida, estes voltam vazios ou, em alternativa, têm de efetuar uma rota diferente da planeada para conseguir transportar alguma mercadoria de forma a rentabilizar a sua capacidade. Contudo, quando há a necessidade de alterar o trajeto existem custos adicionais associados devido à maior distância percorrida. Outra situação a destacar está relacionada com a ineficiência dos transportes

intermodais. Apesar de existir um vasto conjunto de expedições que utilizam mais que um meio de transporte, existe um défice na sua sincronização e estes apresentam uma elevada ineficiência em termos de tempo e preço. Por último, mas não menos importante, o facto de existir uma grande quantidade de produtos fabricados que nunca chegam ao mercado correto no tempo indicado, e que acabam por nunca serem vendidos ou utilizados. As situações acima descritas são apenas alguns exemplos daquilo que se verifica nos dias de hoje e onde é necessário efetuar alterações ao processo.

Dada a problemática apresentada, é essencial alterar a realidade atual e trabalhar naquele que é o desafio da sustentabilidade logística global. Este desafio tem como principal objetivo promover a sustentabilidade global na mobilidade dos objetos físicos, no armazenamento, em todas as partes da produção (montagem, acabamento e abastecimento) e na utilização dos produtos. Na perspetiva económica, este desafio irá traduzir-se em ganhos significativos ao nível da produção, do transporte e da produtividade. Em termos ambientais, o objetivo centrar-se-á na redução da poluição e do consumo de energia. Existem também impactos significativos ao nível social como o aumento da qualidade de vida para os cidadãos em geral (Montreuil, 2011).

De forma a fazer face ao desafio colocado à logística, surgiu o conceito *Physical Internet* (PI). Apesar de existirem várias definições, os autores (Montreuil et al., 2012, p. 3) definiram o conceito como sendo “um sistema logístico global aberto, baseado na interconectividade física, digital e operacional por meio do encapsulamento, interfaces e protocolos”. É um sistema que irá atuar, essencialmente, ao nível da organização logística e que estará sempre em constante evolução e adaptação aos diferentes contextos. Está subjacente a este conceito a inovação tecnológica e das infraestruturas e será uma alternativa bastante promissora para ultrapassar todos os desafios colocados à logística nos dias de hoje. O desafio será alcançado quando se conseguir obter, a longo prazo, um elevado desempenho em termos económicos, ambientais e sociais, e quando o sistema logístico for capaz de enfrentar os diferentes desafios associados a um contexto dinâmico e de contribuir positivamente para o futuro das novas gerações.

Assim, estamos perante um problema atual sendo urgente a sua resolução, dado que está a causar grandes impactos em várias vertentes. É necessário analisar as possíveis soluções e perceber de que forma irão atuar sobre o problema e como poderão ser implementadas. É um desafio colocado à logística que irá transformar a forma como os produtos são transacionados.

Neste seguimento, o projeto de investigação irá abordar a temática do VRP, aplicado ao contexto urbano. As áreas urbanas têm registado um aumento de população, e o transporte de mercadorias tornou-se bastante fluente nessas áreas. No entanto, o seu funcionamento tem afetado negativamente a qualidade de vida dos cidadãos. Assim, é necessário atuar ao nível da redução do congestionamento do trânsito e na promoção da sustentabilidade do meio ambiente, através da redução da emissão dos gases com efeito de estufa, da poluição e dos níveis de ruído (Cattaruzza, Gonzalez-Feliu, Absi, Feillet, & González-Feliu, 2017).

Os efeitos causados na população que se encontra exposta a níveis de ruído elevados são bastante graves e alarmantes. Segundo (INFRAS, CE Delft, ISI, & University of Gdansk, 2007), o ruído pode ser identificado como um som indesejado que causa impactos nos seres humanos em termos fisiológicos e psicológicos. De uma forma geral, o ruído afeta o bem-estar diário da população e a qualidade do sono e pode estar na origem de vários problemas de saúde como problemas cardiovasculares, o aumento do stress e do nervosismo. Um outro artigo refere que além dos

efeitos ao nível da saúde, pode causar também a redução da produtividade no trabalho. Esta situação é explicada pelo facto de os veículos de mercadorias produzirem elevado ruído e a níveis que se encontram acima dos valores médios recomendáveis (Ćirović, Pamučar, & Božanić, 2014). As áreas urbanas são as mais afetadas por este problema e, segundo dados da Agencia Europeia do Ambiente (2013), mais de 54% das pessoas que vivem em áreas urbanas estão expostas a um nível de ruído diurno superior ao valor recomendável 55 dB.

## 1.2. Questão e objetivos de investigação

No seguimento do exposto no ponto anterior relativamente ao enquadramento e à pertinência do tema, este trabalho desenvolveu-se de forma a conseguir responder à seguinte questão de investigação: Qual o impacto no VRP no contexto urbano, tendo em consideração o ruído do tráfego rodoviário e a sustentabilidade da logística?

Com a formulação da questão de investigação é possível ter-se uma ideia mais clara e precisa acerca do objetivo a alcançar. A questão de investigação será o fio condutor de todo o trabalho e, de forma a conseguir responder com sucesso à questão formulada, foram definidos objetivos, nomeadamente, o objetivo geral e os objetivos específicos.

Objetivo Geral:

- Desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão para auxiliar no sistema de distribuição de mercadoria com destino aos centros urbanos.

Objetivos específicos:

- Identificar as principais características do modelo VRP clássico;
- Avaliar o impacto causado pelo ruído na saúde da população;
- Incorporar o efeito do ruído na definição das rotas dos veículos;
- Definir restrições para as rotas dos veículos como o volume de máximo de mercadoria transportada;
- Identificar os principais custos inerentes à distribuição das mercadorias;
- Conceber e desenvolver um novo modelo para o VRP;
- Aplicar o modelo no software de otimização CPLEX;
- Definir rotas para os veículos que minimizem os custos e que cumpram todas as restrições impostas.

## 1.3. Opções metodológicas

O projeto desenvolvido teve por base uma estratégia de investigação assente em duas principais componentes: a revisão bibliográfica e o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão. Para a sua realização foram necessárias, essencialmente, quatro fases: definição do tema, pesquisa, tratamento da informação e apresentação de resultados.

A fase da definição do tema foi o ponto de partida para a realização de todas as fases subsequentes, e consistiu fundamentalmente na definição do tema, dos principais tópicos a abordar e uma compreensão geral dos tópicos identificados. Foi necessário efetuar alguma pesquisa em obras de referência sobre os conceitos básicos de forma a adquirir conhecimentos sobre o tema.

Após a identificação do problema a analisar, iniciou-se a fase de pesquisa de informação. A informação que consta no capítulo da revisão bibliográfica foi consultada em livros, artigos e relatórios científicos. Devido à grande quantidade de informação encontrada foi necessário proceder ao tratamento da mesma, de forma a garantir a recolha de informação sobre as temáticas mais importantes, como o VRP (as suas principais características, restrições e objetivos), o funcionamento da logística no contexto urbano e o impacto do ruído do tráfego rodoviário na saúde da população.

Após a análise do problema em termos teóricos e práticos, foi desenvolvido um novo modelo com base no modelo clássico e implementado no *software* de otimização da *Internacional Business Management* (IBM), denominado de CPLEX para, posteriormente, analisar os resultados obtidos.

Quanto ao método científico, foi utilizado o método dedutivo na medida em que, o projeto teve por base o problema do roteamento de veículos clássico, e que foi adaptado a um novo contexto. Após a formulação do modelo, o mesmo foi ser testado e validado para depois proceder à análise de resultados.

#### **1.4. Estrutura do trabalho**

O presente documento encontra-se organizado em cinco principais capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Métodos e Aplicação, Resultados e Discussão e Conclusão.

Na Introdução é exposta informação que sustenta o enquadramento e a pertinência do tema abordado, apresentados os objetivos de investigação, as opções metodológicas e a descrição da organização do trabalho.

Na Revisão Bibliográfica consta o estado da arte, onde são abordados vários conteúdos relacionados com o tema, assim como informação relevante de suporte para o desenvolvimento do novo modelo para o VRP.

Nos Métodos e Aplicação é descrita a forma de inclusão do ruído no modelo VRP e apresentado o modelo matemático a implementar.

Segue-se o capítulo dos Resultados e Discussão onde são apresentados os principais resultados do modelo clássico e do modelo desenvolvido, para um conjunto de *outputs*, obtidos após a implementação dos modelos no *software* CPLEX.

Por fim, na Conclusão são apresentadas as principais limitações que surgiram ao longo da realização deste trabalho, propostas para trabalhos futuros relacionados com o tema e ainda a resposta à questão de investigação que é alcançada no seguimento da informação apresentada no capítulo anterior.

Complementam estes capítulos, o Resumo, os índices e listas, bem como as Referências Bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como propósito apresentar a revisão da literatura científica mais relevante sobre o tema da dissertação, visando esclarecer os vários conceitos teóricos necessários à compreensão da mesma. A revisão bibliográfica apresentada aborda várias temáticas, como a funcionamento da logística, o VRP no contexto urbano e o impacto do ruído proveniente do transporte rodoviário na saúde da população exposta.

### 2.1. Logística Convencional

A logística é um tema estudado e abordado por vários autores e, como tal, é possível encontrar-se várias definições, com diferentes pontos de vista. Para a associação mundial Council of Supply Chain Management Professional (2020, par. 6) a logística é vista como “um processo de planeamento, implementação e controlo eficiente e eficaz do transporte e armazenamento de bens, serviços e informações relacionadas desde o ponto de origem até ao ponto de consumo, com o objetivo de satisfazer as necessidades dos clientes”.

De uma forma genérica, a logística está diretamente relacionada com a distribuição de algum produto ao longo da cadeia de abastecimento, e possibilita a ligação entre o mercado da procura e o mercado da oferta (Mears-Young & Jackson, 1997).

Para Daskin (1985, p. 383) a logística é “o funcionamento dos sistemas físicos, gerenciais e informativos necessários para permitir que os bens ultrapassem o tempo e o espaço”. O autor continua referindo que a logística tem um grande impacto na economia dos países. No caso dos EUA, os custos logísticos podem representar cerca de 15% a 23% do PIB e, em algumas empresas individuais, esse custo pode representar até 20% das suas vendas líquidas.

Um produto passa por várias fases e locais até chegar ao consumidor final. Após a conclusão de um produto, o mesmo é enviado para o armazém onde é armazenado e, posteriormente, vendido a retalhistas ou diretamente aos consumidores finais. Todos os intervenientes neste processo desde as fábricas, os armazéns, os centros de distribuição, os retalhistas, os consumidores e ainda a matéria-prima e os produtos acabados, fazem parte da rede logística, como é visível na Figura 1. É importante ter em consideração a relação entre todas as partes do processo para que seja possível obter uma redução dos custos e um aumento do nível de serviço (Bramel & Simchi-Levi, 1997).

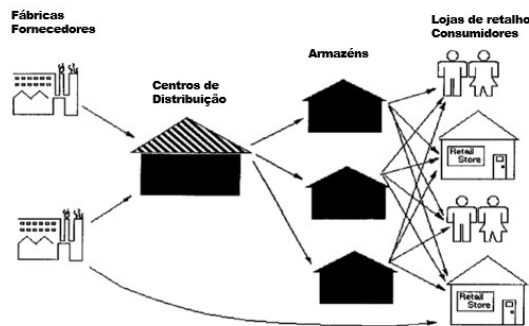


Figura 1 A rede logística  
(Adaptado de Bramel & Simchi-Levi, 1997)

A gestão logística tem em consideração todos os fatores que têm impacto na eficiência do processo e garante que os produtos cumprem todos os requisitos do consumidor. O objetivo da logística é ser eficiente e minimizar os custos ao longo de todo o sistema. Dado que a logística atua ao nível do planeamento, implementação e controlo da rede logística, qualquer decisão ou alteração ao processo tem impactos diretos nas atividades estratégicas operacionais das empresas (Bramel & Simchi-Levi, 1997).

Adicionalmente, existem quatro tipos de fluxos no sistema logístico que são importantes de mencionar. O primeiro é o fluxo de matérias, que representa os vários processos por onde passam os bens, desde a origem até ao consumidor final. Este fluxo deve ser efetuado sem qualquer tipo de atraso de forma a evitar custos adicionais. O segundo trata-se do fluxo de mercadoria, onde está subjacente o processo de transferência da mercadoria dos produtores para os consumidores, através dos grossistas ou retalhistas. Segue-se o fluxo monetário relacionado com os pagamentos e a transferência de fundos. Por último, mas talvez o mais importante, o fluxo de informação. Para que todo o processo funcione eficientemente é necessário que haja troca de informação entre todos os membros que operam na rede logística. É essencial que estes quatro fluxos funcionem na sua plenitude de forma fluente, para que seja possível obter sinergias do sistema logístico (Chiu, 1995).

Assim, efetuar uma boa gestão logística é importante para todas as empresas pois permite que estas adquiram uma posição de destaque no mercado em que estão inseridas, diferenciando-se das restantes empresas da concorrência, devido ao nível do serviço prestado ou à qualidade do produto. Contudo, a logística só se torna numa potencial ferramenta caso as estratégias adotadas na gestão logística sejam parte integrante da estratégia global da empresa (Arbache, 2011)

No entanto, tem-se assistido a um aumento da competitividade nos mercados mundiais e isso tem acarretado novos desafios para as indústrias, principalmente, ao nível do seu sistema logístico. Além disso, com o progressivo desenvolvimento ao nível das comunicações e das tecnologias passou a ser mais fácil a comunicação entre os agentes, e a ser possível efetuar entregas durante o horário noturno (Bramel & Simchi-Levi, 1997).

A mudança que se tem verificado nos sistemas de distribuição faz aumentar a necessidade de estabelecer uma estrita relação entre todos os intervenientes, através de uma comunicação mais eficiente e de um maior suporte sempre que seja necessário, de forma a garantir que é prestado ao cliente um serviço de qualidade. É de igual forma necessário que haja uma grande cooperação entre a organização governamental do país em questão e os membros da cadeia de abastecimento, de forma a resolverem da melhor forma possível a situação e, como resultado, conseguirem criar bom ambiente operacional. Portanto, é fundamental que a logística esteja em constante adaptação e evolução (Chiu, 1995).

## **2.2. Physical Internet**

O conceito Physical Internet (PI) é um novo paradigma relacionado com várias áreas da logística como o transporte, o armazenamento de mercadorias, a forma de funcionamento e o *layout* dos centros de distribuição. A aplicação deste novo conceito tende a mudar a forma de funcionamento da logística tradicional, uma vez que o processo atual tem vindo a demonstrar que não é sustentável em termos económicos, ambientais e sociais (Montreuil, Meller, & Ballot, 2010).

Este facto torna-se mais relevante quando analisamos as tendências globais da logística. Em geral, as economias modernas têm vindo aumentar a sua dependência do funcionamento da logística, particularmente, ao nível do transporte. No caso dos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), espera-se um crescimento de 37% no transporte de mercadorias entre 2005 e 2025. Esta situação tem impactos diretos na sustentabilidade do meio ambiente, dado que nos países desenvolvidos, cerca de 15% das emissões de gases de efeito de estufa já são da responsabilidade do transporte de mercadorias (Montreuil et al., 2010).

A PI surgiu então como uma possível solução a esta realidade que tem demonstrado ser bastante insustentável (Montreuil et al., 2010). Este conceito foi introduzido pelo professor Benoit Montreuil da Universidade Laval de Quebec, e consiste em adaptar a maneira como se armazena, manipula e se move os objetos físicos (Maslarić, Nikolić, & Mirčetić, 2016).

A PI tem subjacente a utilização de unidades de carga padronizadas e a criação de novas formas de negócio através da celebração de novos protocolos logísticos. O objetivo é conseguir criar um sistema logístico que seja colaborativo e impulsionador, ao invés do que se verifica atualmente, pois o sistema tradicional é bastante fragmentado e com elevada dificuldade em otimizar os processos (Montreuil et al., 2010).

A PI tem em consideração três tipos de elementos físicos (ver Figura 2): os *containers*, os *nodes* e os *movers*. Os *containers*, neste contexto, representam uma unidade modular de carga, no qual a mercadoria é colocada para ser transportada, manipulada e armazenada. Os *nodes* dizem respeito aos novos interfaces da cadeia de abastecimento como as lojas e os centros de distribuição. Por último, os *movers* são responsáveis por transportar os *containers* entre e dentro dos diferentes nós, e encontram-se dotados de novas tecnologias. Estes três elementos físicos da PI possuem uma característica em comum que é o uso livre por todos os utilizadores (Montreuil et al., 2010) (Maslarić et al., 2016).

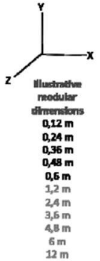
$\pi$ -containers	$\pi$ -nodes	$\pi$ -movers
 <p>Illustration modular dimensions 0,12 m 0,24 m 0,36 m 0,48 m 0,6 m 0,8 m 1,2 m 1,6 m 2,4 m 3,6 m 4,8 m 6 m 12 m</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\pi</math>-site</li> <li>• <math>\pi</math>-facilities</li> <li>• <math>\pi</math>-system</li> <li>• <math>\pi</math>-transit</li> <li>• <math>\pi</math>-switch</li> <li>• <math>\pi</math>-bridge</li> <li>• <math>\pi</math>-sorter</li> <li>• <math>\pi</math>-composer</li> <li>• <math>\pi</math>-store</li> <li>• <math>\pi</math>-gateway</li> <li>• <math>\pi</math>-hub</li> <li>• <math>\pi</math>-distributor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\pi</math>-vehicle</li> <li>• <math>\pi</math>-boat</li> <li>• <math>\pi</math>-locomotive</li> <li>• <math>\pi</math>-plane</li> <li>• <math>\pi</math>-robot</li> <li>• <math>\pi</math>-truck</li> <li>• <math>\pi</math>-carrier</li> <li>• <math>\pi</math>-trailer</li> <li>• <math>\pi</math>-tug</li> <li>• <math>\pi</math>-wagon</li> <li>• <math>\pi</math>-conveyor</li> <li>• <math>\pi</math>-handler</li> </ul>

Figura 2<sup>1</sup> Os três principais elementos da *Physical Internet* (Montreuil et al., 2010)

Uma das principais características do PI é a interconectividade universal, que assegura a plena cooperação entre todos os intervenientes na cadeia de abastecimento e a compatibilidade dos recursos e das soluções tecnológicas utilizadas. A interconectividade universal só é possível devido à interconectividade digital, física e operacional (Ballot, Gobet, & Montreuil, 2012).

<sup>1</sup> A figura contém informação em inglês por não haver uma tradução correta para português de determinados termos.

A interconectividade digital está relacionada com o encapsulamento das mercadorias nas unidades de carga inteligentes. Devido às suas características, é possível estabelecer a comunicação entre as unidades de carga com todos os restantes elementos da PI. Esta situação só é possível em virtude das vantagens da internet das coisas (IoT) (ver Figura 3). A interconectividade física esta relacionada com a interconectividade digital e com um dos principais elementos físicos da PI nomeadamente, as unidades modulares de carga. Dado que são dotados de características inteligentes, estes conseguem circular facilmente por toda a rede logística. Quanto à interconectividade operacional, esta está relacionada com a celebração de protocolos e a definição de procedimentos no âmbito da gestão das cadeias de abastecimento (Maslarić et al., 2016).

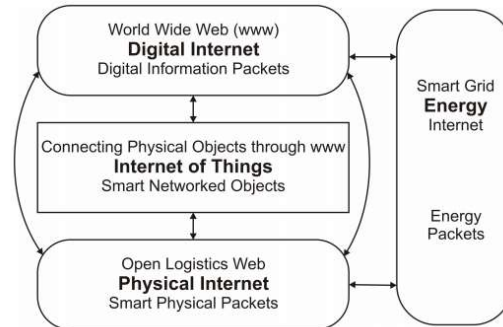


Figura 3<sup>1</sup> Interconectividade física e digital na PI  
(Montreuil, 2012 citado em Ballot et al., 2012)

Em analogia à internet digital, onde as redes se encontraram todas conectadas, o novo sistema logístico deveria também ter as suas redes operacionais conectadas por meio de uma estrutura operacional comum, tornando o transporte de mercadorias e a sua movimentação mais fácil e ágil (Montreuil et al., 2010).

Este é um tema bastante pertinente, visto que ao longo dos últimos anos a pressão por parte dos consumidores e dos governos locais para que as empresas reduzam o seu impacto ambiental tem aumentado substancialmente (Neto, Bloemhof-Ruwaard, van Nunen, & van Heck, 2006). A adoção de práticas amigas do ambiente na rede logística pode gerar inúmeros benefícios para as empresas devido ao facto, por exemplo, de os governos aplicarem impostos adicionais a setores empresariais que não aplicam medidas para diminuir seu impacto ambiental (Neto et al., 2006).

Relativamente aos consumidores, estes têm vindo a demonstrar estar cada vez mais conscientes e sensibilizados para as questões ambientais devido à crescente informação disponível sobre questões como as chuvas ácidas, o efeito de estufa e a desertificação (Neto et al., 2006).

No entanto, para que seja possível a implementação do conceito PI é necessário que haja uma significativa reorganização da rede logística e dos recursos utilizado, para conseguir mudar a forma como os produtos são concebidos e distribuídos pelas cidades (Montreuil et al., 2010).

### 2.3. Cross-Docking

O *cross-docking*<sup>2</sup> é um conceito logístico relacionado com a estratégia de armazenamento e distribuição, que consiste em agrupar os produtos e maximizar a carga transportada em cada camião, beneficiando assim do efeito das economias de escala (Stephan & Boysen, 2011).

De uma forma mais detalhada o que se verifica é que as encomendas são recolhidas dos camiões e são agrupadas consoante o destino das mesmas. Posteriormente, são enviadas para o terminal de carga onde serão rapidamente carregadas em camiões que farão o trajeto até ao próximo destino (Stephan et al., 2011).

Como se pode verificar pela descrição de funcionalmente deste novo conceito, o tempo de armazenamento das mercadorias é bastante baixo, uma vez que num período máximo de 24 horas as mesmas seguem para o seu destino. Assim, o objetivo principal do *cross-docking* é maximizar a capacidade dos camiões, ou seja, garantir que os camiões saem completos do terminal, através da consolidação de um grande número de pequenas encomendas (Stephan et al., 2011).

Aplica-se o nome de *cross-docking* ao centro de distribuição onde é aplicada esta metodologia (Wen, Larsen, Clausen, Cordeau, & Laporte, 2009). Normalmente, um terminal *cross-docking* é um edifício retangular com várias docas ao longo do seu perímetro, podendo chegar até às 500 docas por edifício. Os camiões à chegada aproximam-se de uma doca para que a mercadoria seja descarregada. Posteriormente, a mesma é registada e categorizada consoante o seu destino. O transporte até à zona de armazenamento temporário é efetuado normalmente com recurso, por exemplo, a empilhadores. A área onde a mesma é armazenada está relacionada com o seu próximo destino. Após a mercadoria ter sido carregada no camião de saída o mesmo segue até outro edifício onde é efetuado *cross-docking*, e assim sucessivamente, até chegar ao consumidor final. Na Figura 4 pode-se visualizar uma representação típica de um terminal de *cross-docking* (Stephan et al., 2011).

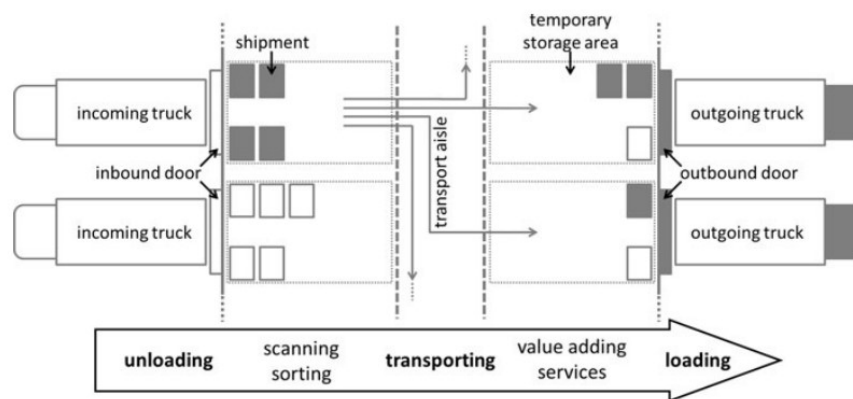


Figura 4 Representação de um terminal *cross-docking*  
(Stephan et al., 2011)

Este conceito já é utilizado por várias indústrias devido às suas evidentes vantagens. De facto, existe uma grande poupança nos custos de transporte, dado que a capacidade dos camiões é maximizada, evitando deslocações desnecessárias. Na ótica do utilizador que recebe a mercadoria, é igualmente

<sup>2</sup> Optou-se por colocar o termo em inglês, uma vez que não existe uma correta tradução para português.

vantajoso, pois o número de descargas é menor, acarretando também menores custos. Em termos ambientais, o impacto é também bastante significativo, visto que permite diminuir o número de entregas e, por conseguinte, um decréscimo da poluição atmosférica e uma diminuição do o tráfego nos centros das cidades (Stephan et al., 2011).

Comparativamente ao centro de distribuição convencional, podem-se enumerar várias vantagens desde a eliminação de stock, o agrupamento/consolidação das encomendas, a redução do espaço necessário para o armazenamento e a diminuição do custo de manuseio e do tempo de ciclo da encomenda. Todas estas vantagens conduzem a um aumento da qualidade no atendimento ao cliente (Wen et al., 2009).

## 2.4. Problema do Roteamento de Veículos

O problema do roteamento dos veículos (VRP) tem sido abordado e estudado ao longo de vários anos e consiste, fundamentalmente, em determinar as melhores rotas para os veículos, quer seja na recolha como na entrega de mercadoria. Em termos gerais, o principal objetivo é minimizar a distância total percorrida pelos veículos e respeitar algumas restrições relacionadas com o funcionamento do processo (Eguia, Racero, & Guerrero, 2012). Este é um dos problemas mais conhecidos de otimização combinatória, é *NP-hard* e está relacionado com o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) (Savelsbergh, Vigo, Cordeau, Laporte, & Savelsbergh, 2007).

A partir do modelo simples do VRP foram criadas variantes que têm em consideração o tipo de bens transportados, o nível de serviço e ainda as particularidades dos veículos e dos clientes (Sawik, Faulin, & Pérez-Bernabeu, 2017).

As principais variantes do VRP são as seguintes:

- VRP com capacidade
- VRP com janelas temporais
- VRP com vários centros de distribuição
- VRP dependente do local
- VRP aberto
- VRP verde

O VRP com capacidade é o problema mais semelhante ao problema clássico do VRP onde são consideradas restrições apenas ao nível da capacidade do veículo. Este problema é útil para definir as rotas necessárias quando a mercadoria dos clientes é superior à capacidade de um veículo (Savelsbergh et al., 2007).

No VRP com janelas temporais é estabelecido um horário (mínimo e máximo) em que um determinado cliente deve ser servido. É possível que o veículo chegue ao cliente antes do tempo indicado, mas caso chegue depois já não consegue efetuar a entrega. Este problema está relacionado, por exemplo, com entregas de alimentos, jornais e revistas (Savelsbergh et al., 2007).

O VRP com vários centros de distribuição, tal como o nome indica, é um problema onde existem vários centros de distribuição e cada veículo está alocado a um. Cada veículo deve iniciar e terminar a sua rota no seu centro de distribuição. Este tipo de problemas está geralmente associado à distribuição de refeições, produtos químicos e gases industriais (Renaud, Laporte, & Boctor, 1996).

No artigo de (Chao & Liou, 2005) é feita uma análise ao VRP dependente do local. Neste problema existe uma relação entre o cliente e o tipo de veículo fazendo com que um cliente possa apenas ser servido por um conjunto de veículos e não por todos.

O VRP aberto diferencia-se do VRP clássico pelo facto de os veículos não regressarem ao centro de distribuição após efetuarem a entrega de mercadoria ao cliente, ou seja, cada rota é iniciada no centro de distribuição e termina num dos clientes. Tem como principal objetivo minimizar o número de veículos utilizados e a distância total percorrida (Brandão, 2004).

Por último, o VRP verde surgiu devido ao impacto ambiental causado pelos transportes e está relacionado com a utilização de veículos com combustíveis alternativos na definição das rotas (Leggieri & Haouari, 2017).

De seguida é apresentado o modelo do VRP com capacidade, uma vez que este é uma das variantes do VRP mais utilizadas (Savelsbergh et al., 2007). O modelo matemático apresentado pelos autores Lin, Choy, Ho, Chung, & Lam (2014) é o seguinte:

$$\min = \sum_{ijk} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_i a_i y_{ik} \leq b_k, k = 1, \dots, k \quad (2)$$

$$\sum_k y_{ij} = \begin{cases} k, i = 0 \\ 1, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ijk} = y_{jk}, j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ijk} = y_{jk}, i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1, S \subseteq \{1, \dots, n\}; 2 \leq |S| \leq n - 1; k = 1, \dots, k \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (8)$$

As constantes utilizadas no modelo são as seguintes:

$k$  – Número de veículos

$n$  – Número total de clientes. O número de clientes varia entre 1 e  $n$  e 0 representa o centro de distribuição

$b_k$  – A capacidade do veículo  $k$

$a_i$  – Volume da mercadoria para o cliente  $i$

$c_{ij}$  – O custo do trajeto direto entre o cliente  $i$  e o cliente  $j$

Variáveis de decisão são:

$$y_{ik} \begin{cases} 1, \text{ se o pedido do cliente } i \text{ é entregue pelo veículo } k \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ se o veículo } k \text{ efetua o trajeto direto entre o cliente } i \text{ e o cliente } j \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$

A função objetivo tem como objetivo minimizar o custo do total das rotas. As três primeiras restrições garantem que a carga alocada a um veículo não ultrapassa a sua capacidade, que cada veículo inicia e termina a sua rota no centro de distribuição e que cada cliente é visitado apenas uma vez. As últimas quatro restrições estão relacionadas com a alocação de clientes a um determinado veículo (problema do caixeiro viajante).

### 2.4.1. Problema do Roteamento de Veículos Verde (GVRP)

Atualmente, tem-se verificado um aumento da preocupação ambiental devido às consequências provocadas pelas mudanças climáticas. As principais organizações empresariais e os governos têm também demonstrado um crescente interesse por este conceito, dado que a forma de funcionamento da logística atual têm-se revelado bastante insustentável a longo prazo. Esta situação deve-se, fundamentalmente, ao impacto causado pelo transporte no meio ambiente (Lin et al., 2014).

Neste seguimento, a logística verde surgiu com o intuito de melhorar a logística tradicional em termos da eficiência energética e da pegada de carbono (Leggieri & Haouari, 2017). A logística verde é então um tema recente que surgiu no âmbito da gestão das cadeias de abastecimentos e dos novos objetivos que estão a ser estabelecidos. Está relacionado diretamente com a avaliação dos impactos ambientais na adoção de novas estratégias de distribuição. Atualmente, o principal objetivo das cadeias de abastecimento é minimizar os custos económicos e ambientais, ao longo de toda a cadeia. Dentro da logística, o processo que causa mais impactos é de facto o transporte de mercadorias. Assim, o problema de roteamento de veículos é uma questão a ser analisada, dado que o modelo tradicional causa muitos impactos em termos ambientais (Lin et al., 2014).

De forma a minimizar os impactos, foi desenvolvido um novo problema denominado de Problema de Roteamento de Veículos Verde (GVRP), que consiste em gerir os custos ambientais e económicos das rotas de distribuição de forma mais eficaz e capaz de fazer face às preocupações ambientais e financeiras (Montoya, Guéret, Mendoza, & Villegas, 2016).

Os autores Leggieri & Haouari (2017) analisaram de forma mais detalhada o GVRP. Estes referem que o problema requer a criação de um largo conjunto de rotas que serão utilizadas por um vasto conjunto de veículos ecológicos (veículos híbridos, elétricos ou que utilizam combustíveis alternativos). Cada rota deve ser iniciada num ponto previamente estabelecido e terminar no mesmo local. Adicionalmente, cada rota deve de ter em consideração os limites máximos regulamentados para o tempo de condução, e o tempo despendido em paragens que sejam necessárias efetuar. O objetivo principal será minimizar a distância e/ou o custo total da rota definida. Por fim, propõem ainda a utilização de uma formulação *Mixed Integer Linear*

*Programming*<sup>3</sup>(MILP) para resolver este problema. Os autores Erdoğan & Miller-Hooks (2012) referem que a utilização desta formulação demonstra ter um melhor desempenho quando comparada com os métodos de solução exatos.

O GVRP consiste então num conjunto de formulações e de técnicas que são desenvolvidas com o intuito de auxiliar as organizações a definir rotas alternativas para os veículos ecológicos que minimizem a distância total percorrida e que satisfaçam todos os clientes, contemplando paragens para os veículos ecológicos para efetuar necessários reabastecimentos de combustível (Erdoğan & Miller-Hooks, 2012).

Existe uma grande variedade de alternativas para promover o transporte ecológico como o uso de combustíveis alternativos, veículos dotados de alta tecnologia, sistemas de transporte inteligentes e infraestruturas ecológicas (Lin et al., 2014).

Os veículos de combustíveis alternativos representam um papel muito importante no contexto das mudanças climáticas, da segurança energética e da poluição do ar (Melaina, Bremson, & Melaina, 2008). No contexto urbano, estes veículos contribuem bastante para a diminuição de vibrações e do nível de ruído. De forma geral, emitem reduzidas quantidades de substâncias tóxicas e podem utilizar como combustível o gás, biodiesel, metanol, etanol, hidrogénio e ainda energia híbrida e elétrica (Ćirović et al., 2014).

A utilização deste tipo de veículos pode ser uma alternativa aos camiões tradicionais a diesel nas operações de recolha e de entrega de mercadoria, especialmente, nas áreas urbanas. Além das vantagens em termos ambientais podem ser estabelecidas medidas para, por exemplo, os veículos e bicicletas elétricas poderem entrar em determinadas zonas que os veículos movidos a combustíveis convencionais não estão autorizados (Fiori & Marzano, 2018).

A escolha do tipo de veículo deve ter em consideração a disponibilidade e o custo do combustível, a quantidade de postos de abastecimento e a eficiência do mesmo. No entanto, a falta de infraestruturas de abastecimento deste tipo de veículos tem-se revelado um obstáculo à adoção de frotas com veículos de combustíveis alternativos (Melaina et al., 2008)

O GVRP é então útil para as organizações que definem rotas para os veículos de combustíveis alternativos na medida em que, será uma forma de superar algumas dificuldades existentes devido às infraestruturas de reabastecimento. Será igualmente vantajoso na análise do número de clientes que podem ser satisfeitos e na determinação do tamanho necessário de uma frota para satisfazer um conjunto de clientes. Terá um impacto direto nas decisões ao nível das operações e nos custos diários inerentes ao funcionamento da distribuição de mercadorias (Erdoğan & Miller-Hooks, 2012).

#### **2.4.2. VRP nas áreas urbanas**

Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (2003), o transporte de mercadorias é uma peça fundamental para grande parte das atividades económicas que se localizam nas áreas urbanas, visto que garante o fornecimento de produtos às lojas, permite entregas diretas nas casas dos clientes e garante a recolha do lixo urbano. As operações logísticas nas áreas urbanas são bastante frequentes e intensas visto que, segundo dados de 2018,

---

<sup>3</sup> O autor optou por colocar o termo em inglês, uma vez que não existe uma correta tradução em português.

aproximadamente 75% da população da EU vive em áreas urbanas, com uma previsão de aumento em 0,5% ao ano (The World Bank, 2018).

Devido à sua afluência, este fluxo representa cerca de  $\frac{1}{4}$  do tráfego que é registado nas cidades. Assim esta situação foi-se agravando ao longo do tempo e tem causado graves problemas ao nível do trânsito e da pressão pública (Kim, Ong, Heng, Tan, & Zhang, 2015).

De facto, a distribuição é efetuada normalmente através de veículos de grandes dimensões que causam grandes impactos no congestionamento do trânsito, pois o espaço de circulação nas áreas urbanas tende a ser bastante limitado (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico, 2003).

O aumento gradual do comércio eletrónico é também um fator que contribui para o aumento das operações logísticas nas áreas urbanas. Um estudo publicado pelo Ecommerce Europe (2019) apontava para um aumento de 13% do *e-commerce* na Europa em 2019, que representaria um total de 621 bilhões de euros.

Posto que, o aumento do fluxo de transporte de mercadorias nas áreas urbanas não é sustentável a longo prazo, é essencial que haja uma organização mais eficiente desse fluxo de forma a promover uma melhor gestão das cadeias de abastecimento, um aumento do *e-commerce* e para garantir um desenvolvimento mais sustentável das cidades (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico, 2003).

Dada esta realidade, surgiu o conceito *City Logistics* que está relacionado com o funcionamento da logística e do VRP nas grandes áreas urbanas. Segundo os autores Taniguchi et al. (2001) citado por Kim et al. (2015, p.1655), o conceito pode ser definido como sendo “o processo de otimizar totalmente as atividades de logística e transporte das empresas privadas nas áreas urbanas, considerando o ambiente de tráfego, o congestionamento e o consumo de energia no âmbito de uma economia de mercado”.

Comparativamente ao VRP clássico, o VRP das áreas urbanas diferencia-se, essencialmente, ao nível das partes interessadas e dos problemas que são tidos em consideração (Kim et al., 2015). Relativamente às partes interessadas pode-se identificar essencialmente quatro, sendo elas o governo local, os moradores, as transportadoras e os expedientes. Como se pode verificar pela Figura 5, existe uma relação entre todas as partes interessadas e, por isso, qualquer medida adotada irá afetar, direta ou indiretamente, todos os intervenientes.

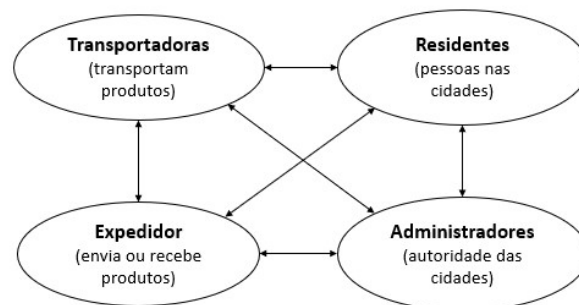


Figura 5 As partes interessadas da logística nos centros urbanos (Taniguchi et al. (2001) citado por Kim et al. (2015))

No entanto, o que se verifica é que, muitas das vezes, as partes interessadas mencionadas têm objetivos diferentes e que podem entrar em conflito (ver Tabela 1). A título de exemplo, o que o governo local pretende é aplicar as melhores políticas para a gestão da cidade, os moradores defendem um aumento da sua qualidade de vida através da redução do trânsito e da poluição, as transportadoras têm como objetivo minimizar os seus custos e, por último, os expedidores de mercadorias pretendem aumentar o nível de serviço prestado (Kim et al., 2015).

Tabela 1 Funções e objetivos das partes interessadas  
(Taniguchi et al. (2001) citado por Kim et al. (2015))

Partes interessadas	Função	Objetivos
<b>Expedidor</b>	Enviar produtos para outras empresas ou consumidores	Maximizar o nível do serviço
<b>Transportador</b>	Transportar produtos	Minimizar o custo do transporte
<b>Residentes</b>	Pessoas que vivem, trabalham e fazem compras nas cidades	Minimizar a poluição do ar, a poluição sonora, o trânsito e os acidentes próximos da área de residencial
<b>Administrador</b>	Gerir a cidade	Aumentar o desenvolvimento económico da cidade, reduzir o tráfego rodoviário

O VRP das cidades tem em consideração questões relacionadas com a regulamentação do trânsito, o congestionamento, as condições de estacionamento e do pavimento bem como, a poluição do ar e sonora (Kim et al., 2015).

O seu principal objetivo prende-se com minimizar os impactos causados pelo transporte de mercadorias nas áreas urbanas de forma a promover o seu desenvolvimento económico e social. Para que isso seja possível, existem diversas questões às quais é necessário prestar atenção e ter em consideração. É necessário contemplar as partes interessadas e as decisões individuais no sistema logístico, coordenar de forma eficiente os transportadores e os expedidores assim como, efetuar a consolidação das mercadorias dos vários clientes e transportadores, para que seja efetuada apenas uma distribuição em veículos ecológicos (Crainic et al., 2009).

Só assim será possível efetuar uma distribuição organizada das mercadorias de diversas origens e destinos, com o apoio de determinadas infraestruturas que efetuam essa consolidação. Esta temática representa um desafio para todas as partes interessadas e irá introduzir novos modelos de negócio através da celebração de parcerias e acordos, contribuindo para o aumento de benefícios para a sociedade (Crainic et al., 2009).

## 2.5. Ruído do tráfego rodoviário

Ao efetuar uma análise geral ao setor do transporte rodoviário pode-se concluir que, este é responsável por realizar o transporte de, aproximadamente, metade dos produtos que circulam na Europa, contribui em 5% para o (PIB) da Europa e garante trabalho a cerca de 3 milhões de pessoas. Apesar de ser um setor com elevada representatividade em termos económicos, existem externalidades negativas associadas ao exercício da atividade como a poluição do ar e a emissão de níveis excessivos de ruído (Comissão Europeia, 2003).

Relativamente ao ruído rodoviário, a sua medição é normalmente efetuada em decibéis (dB) e tem em consideração vários fatores como a meteorologia, as características dos veículos e o pavimento da estrada. Quando se analisa o níveis de ruído, os veículos são diferenciados consoante a sua categoria (Kephalopoulos, Paviotti, & Anfosso-Lédée, 2012):

Categoria 1: Veículos com motores leves

Categoria 2: Veículos com peso médio

Categoria 3: Veículos pesados

Categoria 4: Veículos a duas rodas

O ruído ambiental, também designado de poluição sonora, é claramente um problema de saúde pública e é um dos temas mais abordados quando se analisa as questões ambientais na Europa. Segundo a Organização Mundial de Saúde (2011), a poluição sonora pode causar doenças cardiovasculares, distúrbios de sono e stress, sendo que estes efeitos podem aumentar com o aumento da exposição ao ruído. Na Figura 6, estão representados os principais efeitos na saúde, de acordo com a sua gravidade e o número de pessoas afetadas.

Outros autores argumentam que o ruído ambiental está relacionado significativamente com vários efeitos negativos na saúde das pessoas que se encontram expostas ao ruído, quer seja por um curto período de tempo (mais que um dia) ou a longo prazo (mais que um ano) (Antònia Barceló et al., 2016).



Figura 6 Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e o número de pessoas afetadas  
(Adaptado de Organização Mundial de Saúde, 2011)

Um estudo realizado por Antònia Barceló et al. (2016) debruçou-se em analisar o impacto que o ruído do tráfego rodoviário teve na taxa de mortalidade registada em Barcelona, no período entre 2004 e 2007. Para a realização do estudo foram considerados todos os óbitos causados por enfartes do miocárdio, hipertensão e diabetes do tipo II. Concluiu-se que o ruído rodoviário esteve diretamente relacionado com os óbitos por enfartes do miocárdio e diabetes do tipo II, nos indivíduos do sexo masculino. No caso dos indivíduos do sexo feminino, apenas os óbitos por hipertensão relevaram estar relacionados.

De facto, segundo dados da Agência Europeia do Ambiente (2015), são registados pelo menos cerca de 10 mil mortes prematuras devido à excessiva exposição ao ruído.

O ruído ambiental não deriva apenas do tráfego rodoviário, mas também do tráfego ferroviário e das aeronaves e do funcionamento das indústrias. Segundo dados de 2013, apresentados pela Agência Europeia do Ambiente (2015), sobre a exposição ao ruído ambiental na Europa dentro e fora de aglomerações urbanas, conclui-se que a maioria da população está exposta à poluição sonora causada pelas principais vias rodoviárias, porém este impacto aumenta dentro das aglomerações urbanas. Pode-se então concluir que este é um problema que se agrava nas áreas urbanas com elevada densidade populacional e que se situam perto de rodovias (Organização Mundial da Saúde, 2011).

Foi estabelecido pela Diretiva do Ruído Ambiental da União Europeia (Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, sem data) o valor de 55 dB como o valor recomendável máximo durante o período do dia e o valor de 50 dB para o período noturno. Apesar de estes valores serem os recomendáveis, é possível que se verifiquem efeitos colaterais associados a níveis de ruído mais baixos. Um outro artigo defende que, só é possível estar perante um ambiente sonoro agradável e promotor da saúde e do bem-estar em geral, se os níveis sonoro estiverem abaixo dos 45 dB (Öhrström, Skånberg, Svensson, & Gidlöf-Gunnarsson, 2006). No entanto, os valores de referência estabelecidos não são cumpridos como se pode verificar pela Figura 7, onde mais de 50% das pessoas está exposta a um nível de ruído noturno mais elevado que o recomendado.

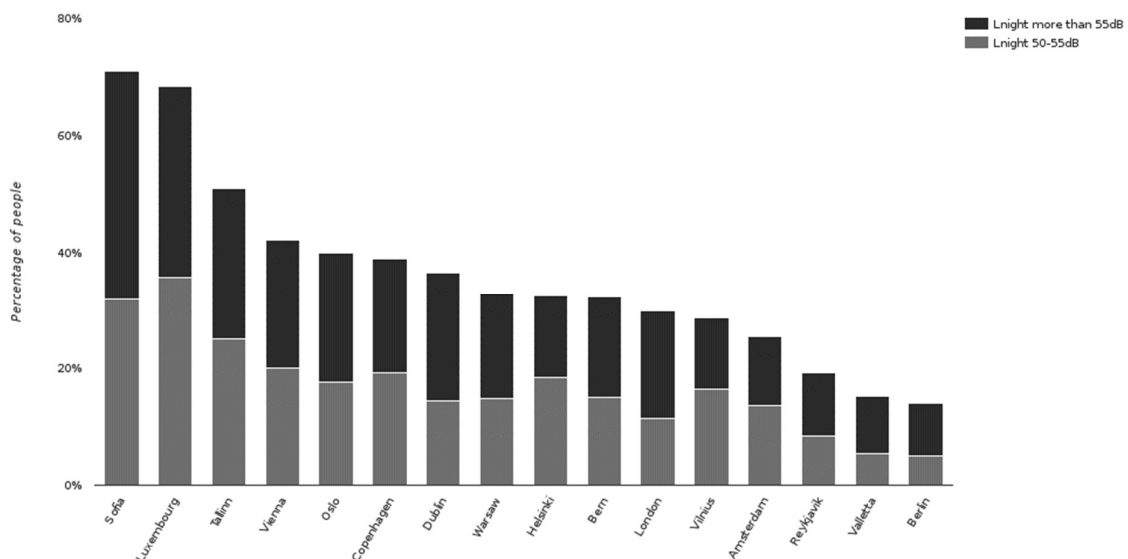


Figura 7 Capitais na Europa: percentagem de pessoas expostas aos valores de *Lnight*<sup>4</sup> (Agência Europeia do Ambiente, 2015)

A utilização de espaços interiores e exteriores silenciosos são benéficos para a saúde e contribui positivamente para o bem-estar fisiológico e psicológico (Öhrström et al., 2006). Devido à falta de conhecimento dos efeitos reais da poluição sonora na saúde dos humanos, tem sido difícil estabelecer medidas de controlo e de prevenção. Os impactos do ruído ambiental na saúde têm merecido uma crescente atenção por parte da população em geral e dos responsáveis pela criação políticas na Europa (Organização Mundial da Saúde, 2011).

<sup>4</sup> *Lnight*: Indicador da Diretiva de Ruído Ambiental para o nível noturno. Com base nos dados relatados pelos países até 28 de agosto de 2013.

### 2.5.1. Características dos veículos ao nível do ruído

As emissões de ruído podem variar consoante a forma de deslocação e o tipo de veículo utilizado (Figura 8). Segundo dados da Agência Portuguesa do Ambiente (2004) a deslocação de peões não provoca nenhum nível de ruído, assim como as bicicletas. Os veículos da categoria dos ciclomotores são os que emitem níveis sonoros mais baixo, dentro da categoria dos veículos motorizados, entre os 66 e os 71 dB(A) (níveis sonoros máximos à saída da fábrica). Os veículos pesados são os que emitem níveis sonoros mais elevados sendo que, o ruído provocado por apenas um veículo já é superior ao recomendado pela OMS.



Figura 8 Níveis sonoros por modo de transporte  
(Adaptado de Agência Portuguesa do Ambiente, 2004)

Adicionalmente, é pertinente referir a utilização de veículos elétricos e os veículos híbridos elétricos têm vindo a aumentar nos últimos anos, e cada vez mais são utilizados nas zonas urbanas. Este tipo de veículos têm um papel essencial na promoção da redução do ruído nas áreas urbanas devido à ausência de ruído (Campello-Vicente, Peral-Orts, Campillo-Davo, & Velasco-Sanchez, 2017).

De facto, a utilização de veículos com emissões de ruído bastante reduzidas ou nulas para a distribuição de mercadoria é uma forma de minimizar os efeitos provocados pelo ruído. Para tal podem ser utilizadas bicicletas e triciclos de cargas assim como, veículos elétricos de pequenas dimensões. Este tipo de veículos contribui ainda para a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa e do congestionamento nas áreas urbanas. No entanto, apresenta algumas limitações relacionadas com a sua capacidade e com a distância a percorrer. Assim, devem de ser conjugados os dois tipos de veículos, por exemplo bicicletas e veículos de distribuição convencionais, de forma a assegurar um processo eficiente na distribuição de carga nas áreas urbanas (Anderluh, Nolz, Hemmelmayr, & Crainic, 2019).

Os veículos elétricos têm vindo a demonstrar ser uma boa alternativa ao uso dos veículos motorizados e, do ponto de vista do custo são bastante competitivos. Devido à sua limitação em termos de capacidade da carga transportada, este tipo de veículos tem sido bastante utilizados para a distribuição de encomendas de pequenas dimensões que se localizem a uma milha de distância (Goeke & Schneider, 2015).

A fase final do processo do processo de distribuição acontece mais ou menos na última milha e é onde se encontram as situações mais complexas em termos operacionais e onde se definem mais rotas. Esta última fase é bastante crucial para manter a qualidade do serviço de entrega e representa o contacto direto com o cliente (Goeke & Schneider, 2015).

## 2.5.2. Veículos elétricos leves de carga

A distribuição de mercadoria nos centros urbanos tem apresentando uma tendência de crescimento devido, essencialmente, ao aumento de pessoas a viver nas cidades e à grande quantidade de espaços comerciais. No entanto, o espaço para as atividades logísticas tem vindo a diminuir (Moolenburgh, Van Duin, Balm, Van Altenburg, & Van Amstel, 2020).

Os clientes estão cada vez mais exigentes e pretendem entregas mais rápidas. Esta situação faz aumentar a quantidade de entregas nos centros urbanos, o que representa um aumento do número de veículos pesados de distribuição, e ainda uma diminuição do tamanho médio das encomendas. Assim, as empresas que operam neste ramo necessitam de se adaptar e ajustar os seus serviços de entrega, de modo a satisfazer de forma eficiente a procura do cliente (Moolenburgh et al., 2020). Além disso, os impactos negativos sentidos nas cidades provocados pelos de veículos pesados de distribuição de mercadoria têm afetado negativamente a qualidade do ar, a segurança nas zonas urbanas e ainda contribuído para o aumento do ruído e do congestionamento. De referir ainda que, a utilização destes veículos nas atividades logísticas nos centros urbanos é dispensável porque apresentam uma carga máxima muito superior ao necessário (Ploos Van Amstel & Balm, 2016)

O objetivo estabelecido para as atividades logísticas nas zonas urbanas para 2025/2030 consiste em realizar as atividades com zero emissões. Assim, este é um desafio adicional para a gestão da logística uma vez que, o serviço tem de ser cada vez mais rápido, com cada vez menos espaço nas zonas urbanas para as suas atividades e ainda, baixo em emissões prejudiciais e poluentes (Moolenburgh et al., 2020).

Os veículos elétricos leves de carga, do inglês *Light Electric Freight Vehicles* (LEFV), apresentam ser uma ótima solução para diminuir estes impactos. De facto, tem havido um crescente interesse por este tipo de veículos e, inclusive, várias empresas já têm disponíveis estes veículos para utilização.

Segundo o projeto Holandês *LEFV-LOGIC: Research On Light Electric Freight Vehicles*, os LEFV podem ser definidos como “uma bicicleta, ciclomotor ou veículo compacto com assistência elétrica ou mecanismos de condução, projetados para a distribuição de mercadoria em espaços públicos, com velocidade limitada”. Este tipo de veículos têm como principais características serem silenciosos, eficientes, não libertarem partículas poluentes e ocuparem menos espaço comparativamente com os veículos convencionais, como os camiões e as vans (Ploos Van Amstel, Balm, Warmerdam, & Boerema, 2018).

Os LEFV são veículos que utilizam bateria ou um motor híbrido para a sua movimentação e pesam geralmente menos de 100 kg. Os veículos mais comuns dentro da categoria dos LEFV são os pequenos veículos elétricos, do inglês *Small Electric Vehicles* (SEV), como por exemplo, as bicicletas e os triciclos elétricos de carga. Estes veículos apresentam vantagens em comparação com os veículos convencionais devido à sua tecnologia de propulsão, às baixas emissões e ao reduzido ruído provocado (Melo & Baptista, 2017).

Na Figura 9 estão representados os três tipos de LEFV:

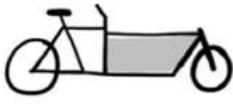


	Bicicleta elétrica de carga	Ciclomotor elétrico de carga	Pequeno veículo elétrico de distribuição
Capacidade	50 – 350 kg	100 – 599 kg	200 – 750 kg
Peso Veículo	20 – 170 kg	50 – 600 kg	300-1000 kg
Exemplo			

Figura 9 Tipos de Veículos elétricos leves de carga  
(Adaptado de Ploos Van Amstel et al., 2018)

Bicicleta elétrica de carga - Este tipo de veículo é bastante eficiente e ativo e pode suportar uma carga até os 350 quilos (kg). É utilizado de forma geral para a distribuição de correio e para a distribuição de encomendas de pequenos volumes.

Ciclomotor elétrico de carga - Este é um veículo mais robusto comparativamente à bicicleta elétrica de carga, com uma capacidade útil de 500 kg no máximo. É adequado para entregas mais pesadas como por exemplo, encomendas de alimentos volumosos e pequenas quantidades de materiais de construção.

Pequeno veículo elétrico de distribuição - É uma pequena van com uma carga útil até 750 kg. É menos ágil do que a bicicleta e o ciclomotor, mas em comparação a uma van, é mais fácil de estacionar, manobrar e de circular em áreas com elevado tráfego e com um espaço limitado de circulação.

No caso das bicicletas elétricas cargas, estas possuem várias vantagens competitivas em relação aos camiões de distribuição de mercadoria dado que apresentam uma maior capacidade de manobra nas cidades devido à possibilidade de utilizar estradas, ciclovias, calçadas e zonas exclusivas para pedestres (Balm, Moolenburg, Anand, & Ploos Van Amstel, 2017).

As principais características dos LEFV no desenvolvimento das atividades logísticas são as seguintes:

- São apropriados para entrega de encomendas com um tempo de entrega limitado;
- Têm capacidade para pequeno número de encomendas por viagem;
- São adequados para realizar entregas com distâncias curtas entre clientes;
- Permitem realizar entregas em áreas movimentadas;
- Podem circular em zonas exclusivas para os LEFV ou em locais com restrições para os veículos.

Adicionalmente, é pertinente referir que os custos deste tipo de veículos são mais baixos, cerca de 20 a 30%, do que os custos associados às vans e aos camiões (Balm et al., 2017). Ao nível dos custos operacionais relacionados com o seguro, impostos e depreciação, os veículos elétricos leves apresentam um custo mais baixo do que as vans ou os veículos pesados. Além disso, a utilização destes veículos na realização das atividades logísticas nos centros urbanos pode reduzir em 25% os custos externos (Melo & Baptista, 2017).

A utilização dos LEFV em viagens de curta distância nos centros urbanos pode ter vantagens ao nível do tempo de entrega uma vez que, estes veículos podem usufruir por exemplo da utilização ciclovias. A utilização das ciclovias permite uma redução da distância da rota em média de 15%-20%, comparativamente às rotas dos veículos convencionais (Balm et al., 2017).

No entanto, existem alguns inconvenientes na utilização deste tipo de veículos dado que não devem de ser utilizados para transportar mercadorias pesadas ou de grandes dimensões. Têm também limitações relacionadas com a velocidade e com a distância percorrida, e não podem circular em autoestradas (Balm et al., 2017).

Pode concluir-se então que a utilização dos LEFV pode ser uma alternativa ao uso de veículos comerciais de distribuição de mercadoria uma vez que, ocupam pouco espaço, são ágeis e não emitem emissões poluentes ou prejudiciais à saúde (Balm et al., 2017).

Devido aos efeitos negativos provocados pelas atividades logísticas nos centros urbanos, é necessário promover qualidade de vida para os cidadãos residentes, mas mantendo o acesso ao consumo de bens e serviços. A mobilidade urbana é uma peça fundamental para o desenvolvimento de um ambiente urbano mais sustentável, que deve intervir essencialmente no desenvolvimento de sistema de transporte de mercadorias mais eficiente (Russo & Comi, 2010).

Assim, a utilização destes veículos nos centros urbanos representa uma alternativa aos veículos convencionais na promoção da sustentabilidade da logística nas zonas urbanas, com significativas vantagens ao nível da mobilidade, dos custos de funcionamento e do meio ambiente (Melo & Baptista, 2017).

### **2.5.3. Abordagens do ruído no âmbito do VRP**

O funcionamento da logística tornou-se essencial para o desenvolvimento de várias atividades. Contudo, os principais processos da logística produzem efeitos negativos no meio ambiente e, no caso particular do transporte de mercadorias, este é considerado um dos maiores poluentes ambientais (Ćirović et al., 2014).

Todos os impactos causados em termos ambientais são designados de externalidades negativas. Estamos perante uma externalidade quando existe um custo ou benefício associado à produção e/ou ao consumo de um bem ou serviço, mas que não está refletido no preço de mercado (Pigou, 1920).

Outros autores não aplicam o conceito de externalidade, mas referem que os custos inerentes aos impactos ambientais são designados de custos externos. Estes custos são obtidos pela diferença entre os custos sociais e os custos internos. Os custos internos dizem respeito aos custos suportados pelos utilizadores, como o custo do combustível e do tempo, e as taxas e impostos que incidem sobre os transportes (INFRAS et al., 2007). O custo social pode ser definido como um custo imposto à sociedade que advém de efeitos negativos causados pelos utilizadores/consumidores dos transportes (Lu, 2012). Em 2016, os custos externos do transporte rodoviário presentavam 5.55% do PIB dos países da União Europeia (Comissão Europeia, 2019).

Os custos externos podem ser divididos em três tipos (Comissão Europeia, 2019):

- Custo total externo: custos totais gerados numa determinada zona pelos veículos;
- Custo médio externo: é determinado com base nos custos totais e na tonelada/km de cada veículo;
- Custo marginal externo: representa o custo adicional derivado do aumento de um veículo.

A Comissão Europeia (2011) já se tem manifestado relativamente à inclusão dos custos externos no custo do transporte de mercadorias. De facto, o custo do transporte deve de incluir não apenas o

custo das infraestruturas, mas também todos os custos externos associados. A internalização das externalidades é uma forma de refletir os custos económicos relacionados com a insustentabilidade. Além disso, é importante que todos os custos estejam refletidos no preço, de forma a estabelecer condições equitativas entre diferentes modos de transporte.

Muitos são os autores que referem que o cálculo do ruído e a sua inclusão no VRP não é obvio nem simples à primeira vista (Sawik et al., 2017 ; Ćirović et al., 2014; Serrano-Hernández et al., 2017). Uma das principais dificuldades em incluir o efeito do ruído no VRP prende-se com o facto de o ruído variar em função de diferentes fatores e, por isso, o seu impacto pode também ser bastante díspar em cenários distintos (Sawik et al., 2017).

Um dos principais fatores que influencia os níveis de ruído é o tipo de veículo utilizado. O ruído provocado pelos veículos pesados de mercadorias varia entre os 88 e os 92 dB, enquanto os veículos leves de mercadoria emitem níveis de ruído inferiores, 79 a 81 dB (Murphy & Poist, 2003 citado por Ćirović et al., 2014).

Na revisão de literatura é possível encontrar-se diferentes abordagens para a inclusão do ruído no VRP:

- No artigo de Sawik et al. (2017) é apresentada uma abordagem para a inclusão dos custos ambientais no GVRP, em termos monetários. O modelo apresentado baseia-se num problema de otimização multiobjectivo, assumindo dois pressupostos: rotas homogéneas e assimetria dos custos em função da distância. A função objetivo consiste na minimização dos custos ambientais em termos monetários, ou seja, a minimização do valor pago pela empresa pelo custo da externalidade do ruído. Adicionalmente, foi também considerado como objetivo a diminuição dos níveis de ruído, da poluição, a quantidade de combustível consumido e ainda a distância total percorrida.
- Dado que o ruído emitido é influenciado pelo tipo de veículo, no artigo de Ćirović et al. (2014) as operações logísticas nas áreas urbanas são efetuadas por veículos amigos do ambiente, do inglês *Environmentally Friendly Vehicles* (EFV), e veículos não amigos do ambiente, do inglês *Environmentally Unfriendly Vehicles* (EUV). Neste seguimento, o estudo apresenta um modelo para o VRP no contexto das áreas urbanas, tendo em consideração as questões relacionadas com o ruído e com a emissão de gases poluentes. O problema apresentado trata-se de um problema de otimização não linear, e tem como objetivo minimizar a poluição do ar, os níveis de ruído e os custos operacionais. Apesar de serem considerados dois tipos de veículos, não existem rotas com a utilização simultânea de ambos, ou seja, as rotas para os EFV e EUV são distintas. No modelo apresentado, uma das variáveis de entrada é o nível ruído. Assim, são apresentadas três equações matemáticas utilizadas para quantificar as emissões de ruído:

$$Leq = 55.5 + 10.2 \log Q + 0.3p - 19.3 \log \left( \frac{L}{2} \right) \quad (9)$$

$$Leq = 38.8 + 15 \log Q - 10 \log L \quad (10)$$

$$Leq = 100 \log(N_c + N_m + 8N_{hv} + 88N_b) + 33.5 \quad (11)$$

onde  $p$  - percentagem de veículos pesados,  $L$  - comprimento em metros da estrada,  $Q$  - total de veículos por hora,  $N_c$  - total de veículos leves por hora,  $N_m$  - total de motociclos por hora,  $N_{hv}$  - total de veículos pesados por hora,  $N_b$  - total de autocarros por hora. O parâmetro  $Q$  é obtido segundo a premissa de que um veículo pesado corresponde a seis veículos leves e um motociclo a três veículos leves.

- Um outro artigo baseou-se em medir os custos ambientais mais relevantes para o preço dos transportes que, normalmente, são aqueles custos que variam em função da distância percorrida como a poluição do ar e o ruído (Bickel, Friedrich, Link, Stewart, & Nash, 2006). Assim, é apresentada uma metodologia para a medir os custos ambientais do transporte com base numa estimativa do custo marginal e total. Para isso apresenta duas abordagens (Bickel et al., 2006).
  - Estimar o custo total e, posteriormente, fazer a alocação do custo em função do tráfego de veículos (abordagem *top-down*)
  - Estimar o custo marginal em função tempo, espaço e tipo de veículo (abordagem *bottom-up*).

De facto, a maioria dos estudos que abordam os impactos ambientais nos transportes utilizam uma abordagem *top-down*. No entanto, os custos marginais do ambiente variam consoante o tipo de veículo e as características da rota (zonas com maior ou menor densidade populacional). Posto isso, os autores defendem a utilização da abordagem *bottom-up* de forma a obter uma melhor aproximação do valor. Neste caso os custos marginais do ruído foram calculados tendo em conta a população afetada, o período do dia, o número de veículos e a sua velocidade.

- Segundo o artigo de INFRAS et al (2007) o custo do ruído é constituído pelo custo de aborrecimento, relacionado as atividades de lazer e sociais, e com o custo de saúde explicado principalmente pelo aparecimento de várias doenças. No entanto, estes custos são habitualmente obtidos de forma distinta. Os custos de aborrecimento com base em modelos de preferência e os custos de saúde com obtidos com base no número de respostas obtidas. À semelhança também de outros autores, são apresentas as abordagens *bottom-up* e *top-down* para estimar o custo do ruído:
  - Abordagem *bottom-up* ou – Esta é utilizada para obter o custo marginal que representa o custo adicional de um veículo no tráfego rodoviário existente. O custo marginal é obtido pela diferença dos custos obtidos em dois cenários distintos. Um dos cenários representa o cenário base onde são refletivas várias variáveis como o volume do tráfego, a velocidade e o tipo de veículo, e o segundo cenário é baseado no cenário base, mas com um veículo adicional (Comissão Europeia, 2003).
  - Abordagem *top-down* – Esta abordagem é baseada na disposição a pagar dos indivíduos ou na disposição a aceitar como forma de compensação para obter um cenário com menor ruído. Através do número de pessoas expostas ao ruído e da distância percorrida de uma rota é obtido um valor médio.

Estas duas abordagens são possíveis de aplicar. No entanto, o custo marginal do ruído numa zona com elevado ruído, como é o caso das zonas urbanas, é bastante baixo. Isto acontece devido à natureza logarítmica da medida do ruído (dB), onde o custo marginal do ruído diminuiu à medida que aumenta a densidade do tráfego rodoviário.

Assim, na Figura 10 é apresentada a abordagem para estimar o custo externo total derivado do ruído do tráfego rodoviário:

Custos externos do ruído = Emissões de ruído \* número de pessoas afetadas \* danos por ruído (dB)

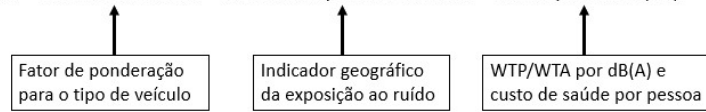


Figura 10 Modelo proposto para estimar o custo externo do ruído

- No artigo de Lu (2012) é apresentado um modelo para obter uma rede de distribuição ótima tendo com o objetivo minimizar os custos totais da distribuição, tendo em consideração os custos externos onde se encontra incluído os custos de ruído. A função objetivo do modelo consiste em minimizar o custo de transporte dos fornecedores para os centros de distribuição e dos centros de distribuição para os clientes, e ainda os custos variáveis e os custos externos. Os custos externos são definidos em função da distância e do volume de mercadoria transportada.

A função objetivo foi definida da seguinte maneira:

$$\min F = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^j \sum_{k=1}^k a_{jk} y_{jk} + \sum_{j=1}^j \sum_{j=1}^j v_j z_{ij} + \sum_{j=1}^j \sum_{k=1}^k h y_{jk} S_{jk} \quad (12)$$

As variáveis utilizadas são:

$c_{ij}$  - Custo da rota do fornecedor  $i$  para o centro de distribuição  $j$

$z_{ij}$  - Número de produtos do fornecedor  $i$  para o centro de distribuição  $j$

$a_{jk}$  - Custo da rota do centro de distribuição  $j$  para o consumidor  $k$

$y_{jk}$  - Número de produtos do centro de distribuição  $j$  para o consumidor  $k$

$v_j$  - Custo variável do centro de distribuição  $j$

$S_{jk}$  - Distância do centro de distribuição  $j$  para o consumidor  $k$

$h$  - Custo externo do veículo por tonelada (foram atribuídos valores entre 1 e 0)

- Um outro artigo (Eguia et al., 2012) apresenta um modelo ecológico e eficiente para o VRP utilizando um modelo MILP, bastante similar ao modelo de Lu (2012). O custo do ruído é constituído pelo custo de aborrecimento e pelo custo de saúde, tendo sido utilizado valores entre 0,25 e 32 (2000€/ ton - km) como valores de referência para o custo do ruído dos veículos pesados de mercadorias, com base no estudo de Verbeek (INFRAS, CE Delft, ISI, & University of Gdansk, 2008). O modelo foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer rotas que minimizassem o custo interno e externo. Quanto aos custos internos foram considerados os custos do motorista, da energia, da manutenção e ainda os valores de impostos, da inspeção e das taxas de portagem. Nos custos externos foram considerados os custos derivados das mudanças climáticas, do ruído, da poluição do ar e dos acidentes. O custo do ruído foi definido no modelo pela seguinte equação:

$$NSC = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m ne d_{ij} f_{ij}^k \quad (13)$$

onde  $ne$  - custo das emissões de ruído por tonelada e por distância (km),  $d_{ij}$  - distância do nó  $i$  até ao nó  $j$  ( $i \neq j$ ) e  $f_{ij}^k$  - mercadoria transportada pelo veículo  $k \in \{1, \dots, m\}$  do nó  $i$  até ao nó  $j$  ( $i \neq j$ ).

- Segundo Serrano-Hernández et al. (2017) para avaliar em termos monetários os impactos ambientais causados pelo transporte como a poluição do ar e o ruído devem de ser utilizado o Método de Avaliação Contingente. Este método baseia-se na aplicação de técnicas de preferência declarada onde a população alvo é questionada sobre a sua disposição a pagar para obter um cenário com melhores condições que o atual. A metodologia utilizada neste artigo consistiu em determinar todos os custos externos associados ao ruído (soma de todos os valores obtidos) e, posteriormente, alocar esses custos aos vários segmentos da rota que apresentam diferentes níveis de densidade populacional. Foi utilizada a seguinte equação para alocar o custo externo a cada troço em função do número de famílias afetadas e da intensidade do tráfego de veículos pesados:

$$\varepsilon_i = \frac{T_i * H_i}{\sum_i T_i * H_i} * E \quad (14)$$

onde  $T_i$  representa o fluxo médio de veículos pesados que passam no troço  $i$ ,  $H_i$  o número de famílias afetadas e  $E$  o custo total externo, sendo que  $\sum \varepsilon_i = E$

- Anderluh et al. (2019) apresenta um modelo MILP, mais concretamente um problema de otimização multiobjectivo, que tem em conta os custos suportados e ainda os efeitos externos causados em termos ambientais relacionados com a emissão de gases com efeito de estufa e com a perturbação fruto do ruído e do congestionamento. A perturbação está diretamente relacionada com o número de pessoas afetadas num determinado troço da rota de distribuição e é calcula em função da distância e da densidade populacional de cada caminho percorrido. Adicionalmente, foi estabelecido pelos autores dois pontos de interesse onde é acrescido um número adicional de pessoas afetadas: escolas e hospitais. Estes são locais onde existe uma grande aglomeração de pessoas durante o dia e, por isso, as operações logísticas nestes locais têm um maior impacto. Por último, o número de pessoas afetadas é multiplicado por um fator de impacto. O fator de impacto advém do facto de existirem dois tipos de veículos no problema apresentado (veículos convencionais e veículos elétricos e bicicletas de carga) com diferentes emissões de ruído e de não ser possível ter rotas que combinem estes dois tipos de veículos. O problema multiobjectivo apresenta três funções objetivo sendo que, uma delas está relacionada com a perturbação:

$$\min = \sum_{K \in F} \sum_{i \in V_e} \sum_{j \in V_e} x_{ij}^k \theta_{ij}^k \quad (15)$$

$\theta_{ij}^k$  - Perturbação do veículo  $k$  de atravessar o arco  $(i, j)$

$x_{ij}^k$  - 1 se o veículo  $k$  atravessa o nó  $i$  ao  $j$ , 0 caso contrário

$V_e$  - Conjunto de todos os nós

*F* - Rota de todos os veículos

- Yeh (2013) refere no seu artigo que é necessário ter em consideração dois aspetos na avaliação dos custos externos: intensidade da população e o nível de tráfego. A partir destas duas variáveis é possível calcular densidade do tráfego. A densidade do tráfego é considerada como um indicador de pressão uma vez que, quanto maior for a densidade do tráfego maiores serão os efeitos negativos provocados. Posteriormente, é necessário definir o indicador de exposição - número de residentes. Através destes dois indicadores é possível obter o indicador de gravidade de cada área. O indicador de gravidade pode ainda ser definido em função dos quilómetros percorridos através do tráfego e do peso relativo de cada área. Esta metodologia descrita pode ser aplicada para avaliar os custos externos, como o ruído de cada área. Para avaliar o ruído de uma determinada área, a modelo apresentado é o seguinte:

$$a * \sum Ti * Gi = CB_{nacional} \quad (16)$$

onde  $Ti$  representa a intensidade do tráfego da área  $i$ ,  $Gi$  o índice de gravidade da área  $i$ ,  $a$  o coeficiente do ruído e  $CB_{nacional}$  o custo do ruído do país.

- Também um artigo da Comissão Europeia (2019) refere que o ruído causa aborrecimento, mas também impactos na saúde. No entanto, o aborrecimento deve de ser medido/avaliado de uma forma diferente dos efeitos na saúde. A metodologia consistiu em estimar os custos totais e médios através da abordagem *top-down*. Como parâmetros de entrada foram utilizados número de pessoas expostas para cada nível de ruído e o custo do ruído por pessoa exposta (custo do aborrecimento e o custo dos impactos na saúde). Para obter o número de pessoas expostas ao ruído pode-se utilizar dados nacionais ou então recorrer à informação da União Europeia, mais concretamente aos mapas de ruído da Agência Europeia do Ambiente (AEA). O custo de aborrecimento foi obtido através do método das preferências dos indivíduos (disponibilidade a pagar) e os custos da saúde foram retirados do estudo de Defra (2005). O custo externo médio é obtido através da divisão entre os custos totais e a tonelada por quilómetro dos veículos.

Em suma, apesar de existirem abordagens distintas para a inclusão do ruído no VRP, todos os artigos referem que é possível obter um melhor desempenho em termos económicos, ambientais e sociais com os modelos apresentados face ao VRP clássico. A inclusão do custo monetário associado ao ruído nos custos externos é abordada por vários autores bem como, a questão da utilização de veículos mais ecológicos e sustentáveis para a distribuição de mercadoria. Na Tabela 2 consta um resumo dos principais conteúdos sobre a inclusão do ruído no VRP abordados anteriormente.

Tabela 2 Resumo das referências sobre a inclusão do ruído no VRP

Autores	Principais conteúdos
(Sawik et al., 2017)	O artigo defende a utilização da formulação do VRP com vários critérios, sendo um dos critérios de otimização a minimização do valor pago pelo custo da externalidade do ruído.
(Ćirović et al., 2014)	Utilização de veículos amigos do ambiente (EFV) na definição das rotas dos veículos de forma a promover a minimização da poluição do ar, os níveis de ruído e os custos operacionais da logística.
(Bickel et al., 2006)	A incorporação das externalidades no preço dos transportes, nomeadamente os custos ambientais que são os mais relevantes para o preço do transporte, dado que variam em função da distância percorrida. Utilização de uma abordagem bottom-up que consiste em estimar o custo marginal em função do tempo, espaço e tipo de veículo para refletir no custo dos transportes o preço dos efeitos externos.
(INFRAS et al., 2008)	Descrição do custo do ruído (custo de incomodo e de saúde) e apresentação de diferentes abordagens para estimar o custo do mesmo como a utilização do custo marginal do ruído, a disposição a pagar dos indivíduos para obter um melhor ambiente e ainda o custo total externo.
(Lu, 2012)	Apresentação de um modelo para as atividades de distribuição considerando os custos externos, onde está inserido o custo do ruído. Os custos externos foram definidos em função da distância e do volume de mercadoria transportada. É ainda abordada a importância de incluir este custo e a sua dificuldade de avaliação.
(Eguia et al., 2012)	É apresentado um novo modelo ecológico e eficiente para o VRP com a possibilidade de escolha do tipo de veículos a utilizar e definição de rotas alternativas para obter um melhor resultado em termos sociais, ambientais e económicos. O principal objetivo do modelo passa por minimizar os custos internos e externos.
(Serrano-Hernández et al., 2017)	Aborda o tema da poluição sonora e o incómodo provocado pela circulação rodoviária junto das principais vias. Utilização de um procedimento de avaliação contingente para avaliar economicamente os impactos do ruído na população e alocação dos custos externos a cada ligação.
(Anderluh et al., 2019)	É exposto neste artigo a questão da perturbação causada pelo ruído e pelo trânsito dos veículos de distribuição que afeta negativamente a população. Defendem a utilização de pequenos veículos com zero emissões para reduzir os impactos negativos causados. O cálculo da perturbação em função do número de pessoas afetadas, com especial atenção a pontos de referência como escolas e hospitais.
(Yeh, 2013)	Apresentação de método para efetuar uma correta avaliação dos custos externos, dado que estes variam consoante da densidade do trânsito, dos modos de transporte, da população exposta nas zonas urbanas, entre outros. A inclusão das externalidades no custo do transporte está relacionada com o custo monetário do impacto causado na população e no ambiente pela poluição do ar, trânsito, ruído, etc.
(Comissão Europeia, 2019)	Contextualização sobre o ruído e o seu custo, bem como os seus efeitos. Apresentação da metodologia para obter os custos totais e médios do ruído e ainda os custos marginais do ruído.

Página propositadamente em branco

### 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

Tendo por base a informação apresentada no capítulo da revisão bibliográfica, segue-se o desenvolvimento do novo modelo matemático com vista à construção de uma ferramenta de apoio à decisão.

Neste capítulo encontra-se a informação mais específica relacionada com o problema que se pretende resolver, é apresentada a zona alvo de análise e de aplicação do modelo, bem como o detalhe relacionado com o método para a inclusão do ruído no VRP. Adicionalmente, é também neste capítulo exposto o detalhe do modelo desenvolvido ao nível das suas variáveis e restrições.

#### 3.1. Descrição do problema

O problema do roteamento de veículos está relacionado com a definição das rotas mais adequadas para os veículos na distribuição da mercadoria e dos pedidos aos clientes. O seu principal objetivo consiste em minimizar os custos totais de cada rota, estando sujeito a restrições relacionadas, por exemplo, com a capacidade de cada veículo e com o volume da mercadoria transportada, sendo necessário garantir que todos os clientes são visitados por um veículo, ou seja, garantir que todos os pedidos dos clientes são satisfeitos.

Uma das principais diferenças entre o modelo clássico apresentado à posteriori e o modelo desenvolvido neste trabalho, está relacionado com a inclusão do ruído provocado pelo tráfego rodoviário, mais concretamente, pelos veículos de mercadorias. A exposição a elevados níveis de ruído (superiores ao recomendado pela OMS) provoca efeitos negativos adversos na saúde e no bem-estar dos indivíduos.

Este problema é de elevada relevância uma vez que, nas áreas urbanas, o tráfego rodoviário resultante da distribuição de mercadoria é bastante intenso. Esta pressão rodoviária provoca problemas de congestionamento em áreas urbanas, onde geralmente o número de vias e o espaço disponível para deslocação tende a ser mais limitado, comparativamente com as zonas não urbanas. Os veículos pesados de mercadorias emitem níveis de ruído elevados e quando existem uma concentração deste tipo de veículos, os níveis de ruído tendem a ser ainda mais elevados e intensos. Assim, os indivíduos que estão expostos a estes níveis de ruído têm mais tendência a desenvolver problemas de saúde como doenças cardiovasculares e sentem bastante incómodo e perturbação.

Pretende-se então desenvolver um modelo de programação linear inteira mista que represente uma ferramenta de apoio à decisão, cujo objetivo consista em estabelecer rotas de distribuição mais adequadas e que tenham em consideração o ruído e os custos inerentes à distribuição. Assim, no seguimento da informação recolhida na revisão bibliográfica, é necessário identificar o procedimento a seguir para que seja possível incluir o ruído no modelo, de forma a ser exequível a análise do seu impacto no VRP.

### 3.2. Apresentação do caso de estudo

Um dos distritos de Portugal, o Porto, encontra-se situado a norte de Portugal e é limitado pelos distritos de Braga, Vila Real, Viseu e Aveiro e pelo Oceano Atlântico. É constituído por 18 municípios sendo que um deles apresenta o mesmo nome que o distrito e é a sua sede, o Porto (Figura 11). A população residente tem vindo a aumentar ao longo dos anos, apresentando em 2018 um total de 1 778 146 habitantes.

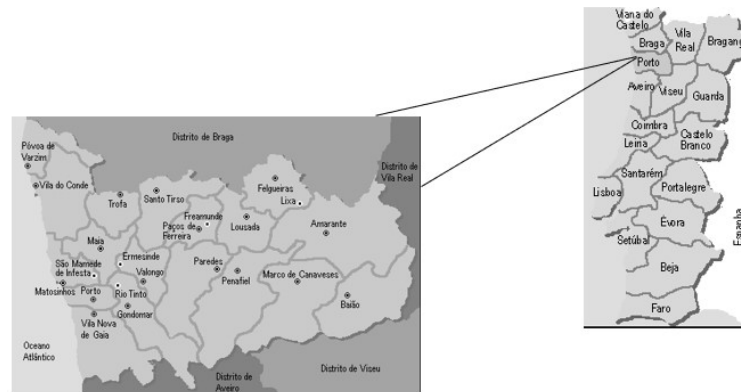


Figura 11 Mapa de Portugal e do distrito do Porto (Dias, 2020)

Em 2019, a cidade do Porto era o terceiro concelho com um maior número de habitantes por  $Km^2$ , e segundo os censos de 2011, apresentava uma população de 237 591 habitantes (Câmara Municipal do Porto, 2015). Apesar de existir no Porto uma rede de metro bastante ampla e uma grande disponibilidade de transportes públicos, os censos de 2011 indicaram que a utilização do transporte individual continuava a ser o principal modo de transporte escolhido pelos indivíduos para efetuar as suas deslocações entre o local de trabalho ou de estudo e a sua habitação, verificando-se ainda um ligeiro aumento face aos números de 2001.

O número de postos de trabalho no município do Porto, em 2011, era de 182 093 postos de trabalho, ainda que este valor tenha sofrido um decréscimo face a 1991 / 2001. Os serviços de natureza económica onde está integrado o comércio, a restauração e o setor financeiro, é o setore de atividade com um dos maiores números de postos de trabalho (Figura 12).

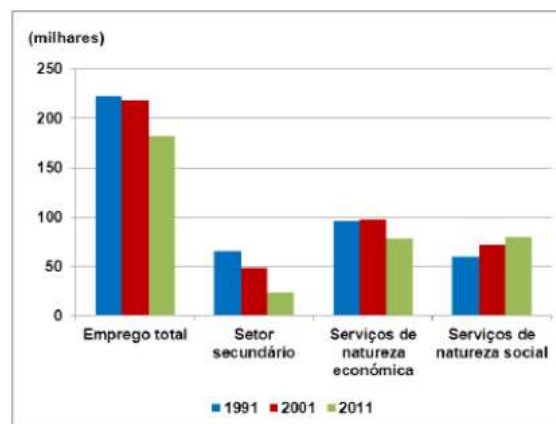


Figura 12 Evolução do emprego no Porto por setor de atividade (Câmara Municipal do Porto, 2015)

No entanto, quando se compara o número de postos de trabalho no Porto com a população residente que se encontra a trabalhar (88 452 mil pessoas em 2011), pode-se concluir que o número de empregos é bastante superior o que revela uma grande polarização económica da área (Câmara Municipal do Porto, 2015).

O tecido empresarial tem também sofrido algumas alterações ao longo dos anos nomeadamente, ao nível do número de empresas e de estabelecimentos que se localizam na cidade. No período de 2003 a 2009 verificou-se uma diminuição do número de empresas e um aumento dos estabelecimentos (Figura 13). Este facto pode ser explicado, em parte, pela deslocação das empresas para a periferia da cidade.

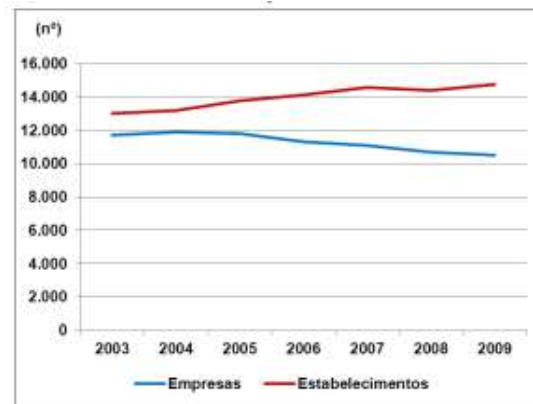


Figura 13 Evolução do número de empresas e estabelecimentos localizados no Porto (Câmara Municipal do Porto, 2015)

Devido às características da cidade do Porto, existem várias áreas com elevada concentração de diferentes atividades o que provoca problemas relacionados com o ruído. Nesse sentido, o Porto conta com o Plano Municipal de Redução de Ruído, onde estão incluídos os Mapas Estratégicos do Ruído do concelho. Estes mapas têm como objetivo avaliar os níveis de ruído diurnos e noturnos e de efetuar uma estimativa da população residente exposta aos diferentes níveis de ruído (Câmara Municipal do Porto, 2015).

Este plano foi desenvolvido em cooperação entre a Câmara Municipal do Porto e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para identificar as áreas mais críticas de sobre exposição da população residente ao ruído da via pública e para estabelecer medidas para reduzir os efeitos adversos provocados. Entre as medidas definidas, destacar a alteração de pavimentos e a limitação da velocidade de circulação no curto e médio prazo e, a longo prazo, as medidas estão relacionadas com a fixação de limites de velocidade para os veículos pesados e em limitar o volume do tráfego destes veículos.

Assim, a cidade do Porto foi a área escolhida para aplicar o modelo desenvolvido devido às suas características relacionadas com a densidade populacional, com a oferta de serviços e de estabelecimentos na via pública e, principalmente, por existirem zonas com problemas significativos ao nível do ruído.

### 3.2.1. O ruído no município do Porto

Antes de avançar para o desenvolvimento do modelo, expõe-se a informação reportada pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) relativa à matéria de gestão de ruído, a fim de analisar a situação do ruído no território do município do Porto.

A Agência Portuguesa do Ambiente (2019) disponibilizou a informação relativa à estimativas da população exposta ao ruído ambiente e ainda mapas de ruído para as aglomerações abrangidas pelo Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de Julho. As aglomerações alvo são municípios com um número população residente superior a 100 000 habitantes e com uma densidade populacional igual ou superior a 2500 habitantes/ $Km^2$ . Assim, contém informação para os seguintes municípios: Amadora, Lisboa, Matosinhos, Odivelas, Oeiras e Porto. Neste trabalho, são utilizados os dados correspondentes ao município do Porto, que foram obtidos de acordo com a metodologia apresentada pela APA no documento publicado em 2011, designado de “Diretrizes para a Elaboração de Mapas de Ruído - Versão3”. As diretrizes apresentadas dizem respeito à medição do ruído ambiental a que se encontram expostos os indivíduos, inclusive aqueles que residem perto parques públicos, escolas, hospitais e outros locais sensíveis ao ruído.

No mapa do ruído global para o município do Porto (Figura 14) estão representadas as fontes de ruído provenientes do tráfego rodoviário, aéreo e ferroviário, referentes ao ano de 2010. No entanto, concluiu-se que o ruído do tráfego rodoviário era a principal fonte de ruído, sendo muito reduzido o efeito das restantes fontes.

No caso do ruído das rodovias, apenas foram consideradas as rodovias com um tráfego médio diário anual superior a 8 000 veículos e, para o cálculo do nível sonoro, foi necessário ter em consideração o número de faixas de rodagem, assim como as características da rodovia ao nível das suas dimensões de largura, do tipo de piso e da inclinação. Em termos quantitativos, foi considerado o número de veículos ligeiros e pesados que circulavam por hora, a sua velocidade média e ainda as condições do tráfego rodoviário.

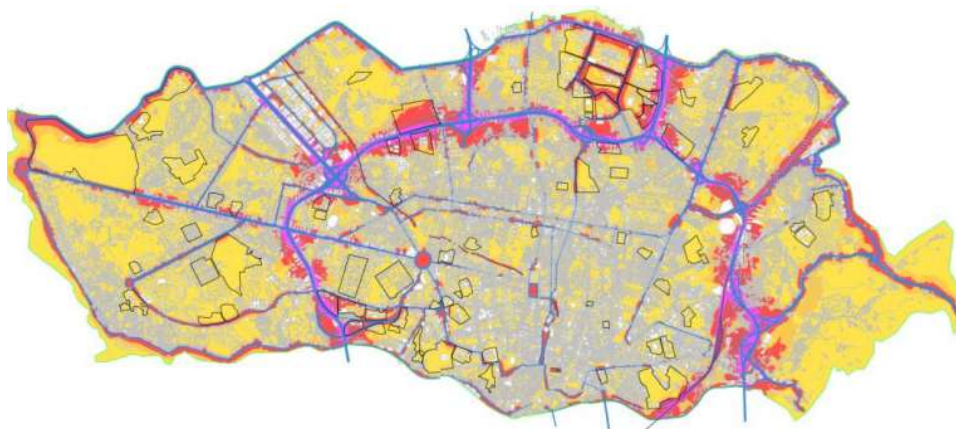







Figura 14 Mapa de ruído global do município do Porto (período 24h)  
(Agência Portuguesa do Ambiente, 2019)

Na Tabela 3 estão representadas as cores que foram atribuídas para cada classe do ruído e que constam no mapa de ruído apresentado. Os dados apresentados estão de acordo com o indicador  $L_{den}$  que representa uma média ponderada dos níveis de ruído para o período de 24 horas.

Tabela 3 Cores representativas da classe do nível sonoro  
(Agência Portuguesa do Ambiente, 2019)

Classes do Indicador		Cor	
$L_{den}$	$L_{den} \leq 55$	Ocre	
	$55 < L_{den} \leq 60$	Laranja	
	$60 < L_{den} \leq 65$	Vermelhão	
	$65 < L_{den} \leq 70$	Carmim	
	$L_{den} > 70$	Magenta	

O cálculo do número de pessoas expostas foi efetuado com base no número de residentes na cidade, de acordo com os censos de 2011 conduzidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE). De um total de 237 591 habitantes, cerca de 37 574 encontram-se expostos a um nível de ruído superior a 55 dB(A). O número de pessoas expostas, para cada nível de ruído  $L_{den}$ <sup>5</sup> do tráfego Rodoviário é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 Estimativa do número de pessoas expostas (em centenas)  
(Adaptado de Agência Portuguesa do Ambiente, 2019)

Tráfego Rodoviário		
	Infraestruturas de Transporte	Grandes Infraestruturas de transporte
$55 < L_{den} \leq 60$	10 584	4 154
$60 < L_{den} \leq 65$	8 821	3 580
$65 < L_{den} \leq 70$	7 930	2 376
$70 < L_{den} \leq 75$	6 218	2 181
$L_{den} > 75$	4 021	3 156

Os mapas de ruído e o número de pessoas expostas a diferentes níveis de ruído constituem uma das principais ferramentas em matéria de planeamento e ordenamento do território, mas também na gestão do ruído.

Existem determinadas zonas designadas de sensíveis onde se encontram inseridos os locais habitacionais, os hospitais, as escolas e as zonas de lazer, onde é extremamente importante assegurar que os níveis sonoros se encontram dentro dos níveis regulamentados.

No caso particular do Porto, existe uma grande oferta de serviços hospitalares e de educação o que reforça a importância de ter em consideração os níveis de ruído nessas áreas e, conseqüentemente, ter informação sobre a estimativa do número de pessoas afetadas. Nesses locais existe uma concentração de pessoas durante o dia, superior ao normal, e as operações de distribuição ocorrem de forma geral no período diurno o que significa que, caso existam pontos de interesse numa determinada rota, o número das pessoas afetadas aumenta (Anderluh et al., 2019).

De forma a demonstrar a importância desta temática no presente trabalho, foram selecionados vários pontos de interesse que se encontram perto de zonas habitacionais e cuja afluência de pessoas é bastante elevada (no caso das escolas optou-se por escolher apenas instituições de ensino superior). Em suma, foram selecionados 12 hospitais incluindo hospitais privados e públicos

<sup>5</sup>  $L_{den}$  representa uma média ponderada do nível sonoro em todos os períodos do dia (período diurno, entardecer e noturno)

e 12 instituições de ensino superior. A localização geográfica de cada um dos pontos de interesse selecionados é apresentado na Figura 15 e na Figura 16.



Figura 15 Localização dos hospitais selecionados<sup>6</sup>



Figura 16 Localização das instituições de ensino selecionadas<sup>6</sup>

### 3.3. Inclusão do ruído no VRP

À semelhança dos custos inerentes ao transporte de mercadorias, o ruído apresenta de igual modo um custo monetário associado devido aos efeitos colaterais provocados na população exposta. O preço ambiental do ruído quantifica a perda de bem-estar quando existe um aumento de um dB nas emissões de ruído. No entanto, como não é possível obter o seu preço com base nos mercados, o custo deve ser obtido indiretamente.

Geralmente, o custo monetário do ruído é constituído pelo custo de incómodo e pelo custo de saúde. Estas são as duas componentes principais do custo do ruído, uma vez que a exposição prolongada a níveis elevados de ruído pode despoletar diversos problemas de saúde e afeta também o bem-estar geral dos indivíduos. O custo do incómodo utilizado neste trabalho teve por base a informação do artigo da Comissão Europeia (2019), tendo sido obtidos através da abordagem *willingness to pay* (WTP), onde os indivíduos foram questionados sobre quanto estavam dispostos a pagar por mudanças no nível de ruído. Os custos de saúde foram consultados no artigo

<sup>6</sup> Figura retirada do *Google Earth*

Department for Environment Food & Rural Affairs (2014), obtidos através do método apresentado no relatório da Organização Mundial da Saúde (2011). Assim, a Tabela 5 apresenta o resumo do preço ambiental recomendado para o ruído em função de diferentes níveis do ruído. Estes dados são utilizados como valores de referência neste trabalho para a inclusão no ruído no VRP.

Tabela 5 Preço do ruído do tráfego rodoviário para a EU28 (€<sub>2016</sub> /dB/pessoa/ano)

(Adaptado de European Commission, 2019)

$L_{den}$ dB(A)	Incómodo	Saúde	Total
50 – 54	14	3	17
55 – 59	28	3	31
60 – 64	28	6	34
65 – 69	54	9	63
70 – 74	54	13	67
≥ 75	54	18	72

Devido à falta de modelos fiáveis para efetuar uma estimativa das emissões de ruído, a Diretiva Europeia (2002/49/CE) relativa à avaliação e gestão do ruído ambiental levou a cabo um projeto com o intuito de desenvolver um método harmonizado e preciso para ser adotado pelos membros da União Europeia (UE). Previa-se que, com o desenvolvimento deste método, os mapas do ruído a partir de 2012 fossem produzidos a partir dos métodos de previsão harmonizados desenvolvidos (Watts, 2005).

O modelo desenvolvido é constituído por três elementos principais (Figura 17): fonte sonora, propagação e nível de ruído. Existem vários fatores externos que podem influenciar estes componentes. Por exemplo, o tipo de veículo e as condições da estrada podem influenciar a intensidade da fonte sonora e a propagação é afetada pelo vento e pela existência ou não de obstáculos para a propagação da fonte sonora. O valor obtido de  $L_{den}$  tem em consideração a média das condições meteorológicas.

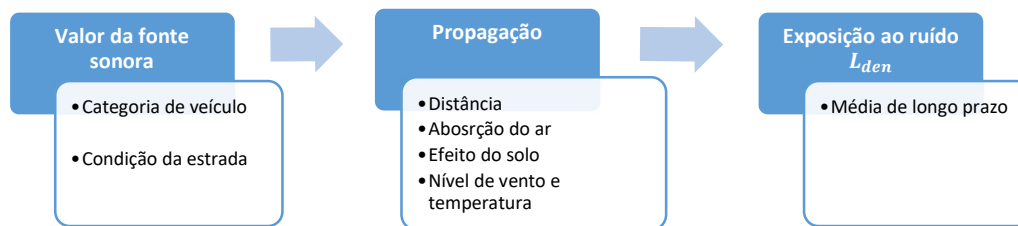


Figura 17 Componentes do modelo do ruído  
(Adaptado de Watts, 2005)

Este modelo apresenta as emissões sonoras em função das categorias dos veículos e tem em consideração, essencialmente, a velocidade e aceleração dos veículos. Foram consideradas três principais categorias de veículos: veículos leves (categoria 1), veículos semipesados (categoria 2) e veículos pesados (categoria 3). Os veículos elétricos foram incluídos numa subcategoria distinta da categoria dos veículos leves, dado que o ruído de propulsão destes veículos é bastante distinto dos veículos a diesel ou gasolina. A partir da potência do som das várias fontes numa determinada direção, foi possível inferir os níveis de ruído de qualquer recetor através da aplicação de um modelo de propagação. O modelo teve por base a metodologia *pass-by* a uma distância de 7.5m. Foram efetuados testes ao modelo desenvolvido que demonstraram que os valores reais obtidos e os previstos pelo modelo nunca apresentavam uma diferença superior a 1.5 dB(A).

A fonte sonora dos veículos pode ser dividida em duas principais fontes, a inferior e a superior. A fonte sonora inferior advém dos pneus dos veículos e da estrada e a fonte superior do ruído de propulsão (Watts, 2005). Assim, o nível sonoro é obtido pelo somatório do ruído de rolamento e de propulsão.

### 3.4. Desenvolvimento do modelo

O problema é definido num gráfico  $G = (N, A)$  em que  $N$  representa o conjunto de clientes e o armazém, e  $A$  o conjunto de todos os arcos definidos entre os diferentes pares de nós existentes. O conjunto de clientes pode variar entre 1 a  $n$  e o armazém é representado por 0. É conhecido o volume da mercadoria destinada a um determinado cliente ( $a_i$ ) e, de forma a assegurar a entrega da mercadoria a cada cliente, está disponível um conjunto de  $k$  veículos com diferentes capacidades ( $b_k$ ). Todos os pedidos dos clientes devem de ser satisfeitos, no entanto, a mercadoria deve ser alocada aos diferentes veículos de forma a não exceder a sua capacidade máxima.

O modelo desenvolvido apresenta janelas temporais de entrega da mercadoria aos clientes que devem de ser respeitadas ( $e_i, l_i$ ), e um tempo máximo de viagem para cada veículo ( $T^k$ ). Os veículos não devem efetuar sub-rotas e devem regressar ao armazém sem mercadoria. É considerada uma velocidade variável para todos os veículos entre o mínimo de 40km/h e o máximo de 70km/h, que influencia o tempo de viagem do veículo entre clientes ( $t_{ij}^k$ ).

Todos os possíveis trajetos ( $i, j$ ) têm associado uma determinada distância calculada em km ( $d_{ij}$ ) e um custo total associado, consoante o veículo utilizado. Este custo é constituído por três principais componentes: custo fixo, custo variável e custo do ruído. O custo fixo está relacionado com a remuneração por hora do motorista que conduz o veículo  $k$  ( $p^k$ ) e o custo variável com o custo do combustível consumido no trajeto, sendo que este valor varia em função da distância percorrida e do peso da mercadoria transportada. Ao trajeto efetuado entre clientes com diferentes localizações existe também um custo monetário associado ao ruído provocado pelos veículos de distribuição. Tendo por base os princípios do modelo Harmónico, são calculadas as emissões de ruído que derivam dos níveis de ruído de rolamento ( $NR_{ij}$ ) e de propulsão ( $NP_{ij}$ ) e, posteriormente, são apuradas as emissões de ruído que se encontram acima de um determinado limite estabelecido. Ao conjunto das emissões de ruído acima do limiar definido, é aplicado um custo monetário constituído pelo custo de saúde e pelo custo de incomodo,

De seguida, é apresentada a formulação matemática do modelo desenvolvido, incluindo a informação relacionada com os parâmetros (Tabela 6), as variáveis de decisão, a função objetivo e as suas restrições (18)-(45).

Tabela 6 Parâmetros do modelo desenvolvido

Parâmetros	Descrição
$k$	Número de veículos $k \in \{1, \dots, m\}$
$n$	Número total de clientes
$d_{ij}$	Distância do nó $i$ até ao nó $j$ ( $i \neq j$ )
$b_k$	A capacidade do veículo $k$
$a_i$	Volume da mercadoria para o cliente $i \in \{1, \dots, n\}$
$p^k$	Remuneração do motorista que conduz o veículo $k$
$[e_i, l_i]$	Janela temporal para visitar o cliente $i$
$s_i^k$	Tempo de serviço no cliente $i$ com o veículo $k$
$t_{ij}$	Tempo de condução entre o nó $i$ até ao nó $j$ ( $i \neq j$ )
$T^k$	Tempo máximo permitido de condução do veículo $k$
$r$	Conjunto de valores da velocidade (km/h) $r \in \{1, \dots, s\}$
$GE_{ij}$	Coefficiente das condições da estrada no nó $(i, j)$
$a_r^k(f), b_r^k(f)$	Coefficientes do ruído de rolamento para o veículo $k$
$a_p^k(f), b_p^k(f)$	Coefficientes do ruído de propulsão para o veículo $k$
$l_{ij}^r, l_{ij}^p$	Limites máximos dos níveis de ruído de rolamento e propulsão no nó $(i, j)$
$nc$	Custo do ruído por dB
$N$	Velocidade do motor em rad/s ( $N = 33$ )
$V$	Cilindrada do motor em litros ( $V = 5$ )
$\kappa$	Fator de atrito do motor (kilojoule/rpm/l) ( $\kappa = 0.2$ )
$\xi$	Rácio da massa combustível - ar ( $\xi = 1$ )
$\psi$	Fator de conversão g/s para/s ( $\psi = 737$ )
$\omega$	Peso meio fio (quilograma) ( $\omega = 6350$ )
$C_d$	Coefficiente de resistência aerodinâmica ( $C_d = 0.7$ )
$A$	Área da superfície frontal $m^2$ ( $A = 3.912$ )
$\rho$	Densidade do ar (quilograma/ $m^3$ ) ( $\rho = 1.2041$ )
$\eta$	Parâmetro de eficiência dos motores a diesel ( $\eta = 0.9$ )
$\eta_{tf}$	Eficiência do sistema de transmissão do veículo ( $\eta_{tf} = 0.4$ )
$g$	Constante gravitacional ( $m/s^2$ ) ( $g = 9.81$ )
$C_r$	Coefficiente de resistência ao rolamento ( $C_r = 0.01$ )
$h$	Valor de aquecimento do combustível diesel kilojoule/g ( $h = 44$ )
$\theta_{ij}$	Declive da estrada do nó $(i, j)$
$\tau_{ij}^k$	Aceleração do veículo $k$ no nó $(i, j)$ (metros/segundo <sup>2</sup> )

As variáveis de decisão do modelo desenvolvido são:

$$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido do cliente } i \text{ é entregue pelo veículo } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \in \{1, \dots, m\} \text{ atravessa o nó } i \text{ até ao nó } j \text{ (} i \neq j \text{)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$V_{ij}^{rk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ atravessa o nó } i \text{ até ao nó } j \text{ com a velocidade } r \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$z_i^k$  – Hora de chegada ao cliente  $i \in \{0, \dots, n\}$

$w_i^k$  – Hora de partida do cliente  $i \in \{0, \dots, n\}$

$f_{ij}^k$  – Mercadoria transportada pelo veículo  $k \in \{1 \dots m\}$  do nó  $i$  até ao nó  $j$  ( $i \neq j$ )

O modelo matemático é o seguinte:

$$\min = FC + VC + NC \quad (17)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq 1 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (18)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij}^k - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ji}^k = 0 \quad (k = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij}^k = 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (20)$$

$$\sum_i a_i y_i^k \leq b_k \quad (k = 1, \dots, m) \quad (21)$$

$$\sum_k y_i^k = \begin{cases} k, & i = 0 \\ 1, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (22)$$

$$\sum_j x_{ij}^k = y_i^k \quad (i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (23)$$

$$\sum_i x_{ij}^k = y_j^k \quad (j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n f_{ji}^k - \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n f_{ij}^k = a_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (25)$$

$$f_{ij}^k \leq (b_k - a_i) x_{ij}^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (26)$$

$$a_j x_{ij}^k \leq f_{ij}^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (27)$$

$$f_{i0}^k \leq 0 \quad (i = 1, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (28)$$

$$z_j^k \geq (e_j + t_{ij}) * V_{ij}^{rk} \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (29)$$

$$z_j^k \leq (l_j - s_j^k) * y_j^k \quad (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (30)$$

$$z_i^k + s_i^k + (t_{ij} * V_{ij}^{rk}) - T^k (1 - x_{ij}^k) \leq z_j^k \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m;) \quad (31)$$

$$z_j^k \leq T^k - (t_{j0} * V_{j0}^{rk}) - (s_j^k * y_i^k) \quad (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (32)$$

$$t_{ij} * V_{ij}^{rk} \leq z_j^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (33)$$

$$w_0^k = 0 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (34)$$

$$w_i^k = z_i^k + s_i^k \quad (k = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (35)$$

$$(t_{j0} * V_{j0}^{rk}) + z_j^k + (s_j^k * y_i^k) \leq T^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (36)$$

$$z_0^k \geq z_j^k + (s_j^k * y_i^k) + (t_{j0} * V_{j0}^{rk}) \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (37)$$

$$\sum_R V_{ij}^{rk} = x_{ij}^k \quad (38)$$

$$L_{ij}^r = \sum_{r,k} GE_{ij} * x_{ij}^k (a_r^k(f) + b_r^k(f) * \log\left(\frac{r}{vref}\right)) \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i;) \quad (39)$$

$$L_{ij}^p = \sum_{r,k} GE_{ij} * x_{ij}^k \left( a_p^k(f) + b_p^k(f) * \log\left(\frac{r - vref}{vref}\right) \right) \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i) \quad (40)$$

$$L_{ij}^r - (l_{ij}^r * x_{ij}^k) = NR_{ij} \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i) \quad (41)$$

$$L_{ij}^p - (l_{ij}^p * x_{ij}^k) = NP_{ij} \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i) \quad (42)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad (i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (43)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (44)$$

$$V_{ij}^{rk} \in \{0,1\} \quad (45)$$

$$(i, j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 40, \dots, 70)$$

A equação (17) representa a função objetivo que consiste em minimizar os custos totais das rotas. Os custos fixos ( $FC$ ) estão relacionados com o valor pago ao motorista (8€/hora) em função das horas de trabalho realizadas que incluiu o tempo de serviço nos clientes e tempo total de deslocações (equação 46).

$$FC = \sum_{i,j}^n \sum_k^m \sum_r^s p^k * V_{ij}^{rk} * \frac{d_{ij}}{r} + \sum_i^n \sum_k^m p^k * s_i^k * y_i^k \quad (46)$$

$$(i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 40, \dots, s)$$

Neste trabalho, os custos variáveis ( $VC$ ) estão apenas relacionados com o custo do combustível consumido nas rotas. Para o cálculo do consumo de combustível são considerados vários parâmetros relacionados com as características dos veículos e com as características da estrada, como é o caso do ângulo de inclinação da estrada entre os diferentes clientes. O consumo de combustível é influenciado pela distância das rotas, pelo peso da mercadoria transportada e pela velocidade dos veículos. O cálculo utilizado no modelo desenvolvido, teve por base o seguinte modelo (Feng, Zhang, & Jia, 2017):

$$Z_{ij} = \left( \kappa NV \lambda / r + \beta \gamma \lambda r^2 + \lambda \omega \gamma \alpha_{ij} + \lambda \gamma \alpha_{ij} f_{ij} \right) d_{ij} \quad (47)$$

As descrições dos parâmetros utilizados constam na tabela dos parâmetros apresentada anteriormente, assim como os valores utilizados, sendo que  $\lambda = \xi / \psi h$ ,  $\gamma = 1 / 1000 \eta_{tf} \eta$  e  $\alpha_{ij} = \tau_{ij}^k + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij}$ .

O modelo do combustível consumido foi adaptado ao modelo desenvolvido no presente trabalho, sendo que os custos variáveis da função objetivo foram calculados da seguinte forma:

$$VC = \sum_{i,j}^n \sum_k^m \sum_r^s \kappa NV \lambda d_{ij} V_{ij}^{rk} / r$$

$$+ \sum_{i,j}^n \sum_k^m \sum_r^s \beta \gamma \lambda d_{ij} V_{ij}^{rk} r^2 \quad (48)$$

$$+ \sum_{i,j}^n \sum_k^m \lambda \omega \gamma \alpha_{ij} d_{ij} x_{ij}^k$$

$$+ \sum_{i,j}^n \sum_k^m \lambda \gamma \alpha_{ij} d_{ij} f_{ij}^k x_{ij}^k$$

Na função objetivo está também incluído a minimização dos custos associados às emissões de ruído do veículo  $k$ , de um determinado trajeto (equação 49). Este custo representa o custo monetário associado aos níveis de ruído de rolamento e propulsão que se encontram acima dos limites definidos.

$$NC = \sum_{i,j}^n (NR_{ij} + NP_{ij}) * 0.0013 + \sum_{i,j}^n \sum_k^m 0.0007 * x_{ij}^k \quad (49)$$

$(i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i; k = 1 \dots, m)$

De seguida é apresentado um breve esclarecimento sobre cada uma das restrições do modelo.

A primeira restrição (18) significa que do armazém apenas partem o máximo de  $k$  veículos disponíveis na frota definida, e a restrição (19) representa a restrição de conservação do fluxo, ou seja, o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída.

É necessário garantir que cada cliente é visitado apenas uma vez (restrição 20), e que a mercadoria transportada para o cliente  $i$ , no veículo  $k$ , não excede a sua capacidade máxima (restrição 21). Segue-se a restrição (22) que assegura que cada veículo  $k$  inicia e termina a sua rota no centro de distribuição.

A equação (23) assegura que do cliente  $i$  apenas parte um veículo  $k$  para o cliente  $j$ , e a equação (24) que o pedido do cliente  $j$  é satisfeito apenas por um veículo  $k$  que vem do cliente  $i$ .

A restrição (25) representa o equilíbrio do fluxo e está relacionada com a mercadoria transportada e a mercadoria associada a um determinado cliente. As restrições (26) - (27) são essenciais para limitar o volume total de mercadoria transportada pelo veículo  $k$ . A restrição (28) garante que o veículo  $k$  regressa ao armazém vazio, sem mercadoria.

As próximas restrições estão relacionadas com as janelas de entrega. As restrições (29) e (30) garantem que o momento de chegada do veículo  $k$  a um cliente está dentro do limite mínimo e máximo da janela temporal do cliente. As restrições (31), (32) e (33) são utilizadas para determinar o tempo de chegada aos clientes. O parâmetro utilizado para o tempo de condução entre os nós ( $t_{ij}$ ) é obtido da seguinte forma:

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{r} \quad (50)$$

Relativamente ao horário de partida dos clientes, a restrição (34) estabelece que cada veículo parte do armazém no momento 0, e na restrição (35) é definido o horário de partida dos clientes. Por fim, a restrição (36) garante que os veículos regressam ao armazém sem exceder o seu tempo máximo de condução, sendo que a restrição (37) é utilizada para calcular o momento de chegada dos veículos ao armazém, após efetuarem o seu serviço. A velocidade dos veículos em cada arco é determinada na restrição (38).

As restrições (39) e (40) são utilizadas para calcular as emissões de ruído de rolamento e de propulsão, respetivamente. O parâmetro  $GE_{ij}$  é utilizado para considerar as condições da estada do trajeto e varia entre 0.5 e 1.2. Os coeficientes  $a_{ij}^r$ ,  $b_{ij}^r$ ,  $a_{ij}^p$  e  $b_{ij}^p$  são fatores de compensação para a frequência e variam em função do tipo de veículo. Os seus valores são dados em bandas de 1/3 de oitava na faixa de frequência de 25Hz a 10kHz. Os valores utilizados para os coeficientes de rolamento e de propulsão, são apresentados no Anexo A e Anexo B, respetivamente.

Estas restrições têm por base o modelo Harmónico que é um modelo de previsão do ruído desenvolvido para os membros da UE. O modelo é baseado em medidas *pass-by* a uma distância de referência de 7.5m e decompõem o nível sonoro na soma do ruído de rolamento e de propulsão. As equações do modelo são as seguintes (Hans et al., 2004):

$$L_{WR}(f) = a_R(f) + b_R(f) \log \left[ \frac{v}{v_{ref}} \right] \quad (51)$$

$$L_{WP}(f) = a_P(f) + b_P(f) \log \left[ \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right] \quad (52)$$

Por fim, o cálculo emissões de ruído de rolamento e de propulsão que ultrapassam o limite definido é dados nas restrições (41) e (42). Os parâmetros  $l_{ij}^r, l_{ij}^p$  variam aleatoriamente entre 52dB a 71dB.

As restrições (43), (44) e (45) definem o domínio das variáveis de decisão do modelo. As variáveis  $y_i^k, x_{ij}^k$  e  $V_{ij}^{rk}$  são variáveis binárias podendo apenas assumir apenas o valor de 0 ou 1.

### 3.5. Definição do problema

Neste subcapítulo é apresentado o detalhe da informação utilizada para a aplicação do modelo clássico do VRP e do novo modelo desenvolvido. A informação selecionada teve como objetivo assemelhar o mais possível este problema a um problema real da atividade logística de uma empresa.

Foram geradas cerca de 10 instâncias com um diferente número de clientes e distintas localizações, com o auxílio do *software* ArcGis, sendo apresentado todo o detalhe ao longo do presente subcapítulo. O *benchmark* apresentado segue-se dividido em cinco principais pontos: frota de camiões, localização do armazém, localização dos clientes, cálculo das distâncias, procura dos clientes, custos fixos e variáveis e, por último, os custos do ruído.

- **Frota de camiões**

Neste caso de estudo, estabeleceu-se uma pequena frota de veículos para assegurar a distribuição da mercadoria pelos vários clientes. A frota considerada envolve um veículo ligeiro de mercadorias e dois veículos pesados de mercadorias, com diferentes valores ao nível do peso máximo de carga (Tabela 7). Para assegurar a distribuição estão disponíveis motoristas aptos a conduzir todos os tipos de veículos mencionados.

Tabela 7 Peso bruto e máximo dos veículos  
(Decreto-Lei n.º 132/2017 de 11 de Outubro)

	Veículo ligeiro de mercadorias	Veículo semipesado de mercadorias	Veículo pesado de mercadorias
<b>Peso Bruto</b>	3500 kg	16 toneladas	23 toneladas
<b>Carga Útil</b>	1505 kg	6 toneladas	14 toneladas

De facto, o dimensionamento da frota é um tema muito importante para as empresas dado que é fundamental para evitar possíveis atrasos e gastos adicionais. Para determinar a quantidade de veículos necessária, devem de ser considerados vários fatores como o peso das encomendas, no entanto esse não é o foco principal deste trabalho.

- **Localização do armazém**

Tratando-se de um problema teórico, procedeu-se à seleção do local do armazém de onde os veículos devem iniciar e terminar a rota previamente estabelecida. O local escolhido situa-se na zona industrial do Porto, onde se encontram sediadas várias outras empresas e armazéns,

apresentando um bom acesso às principais vias de circulação da cidade do Porto (Figura 18). O local escolhido pelo autor da dissertação para o armazém é assim, um local estratégico e que se enquadra no problema desenvolvido.

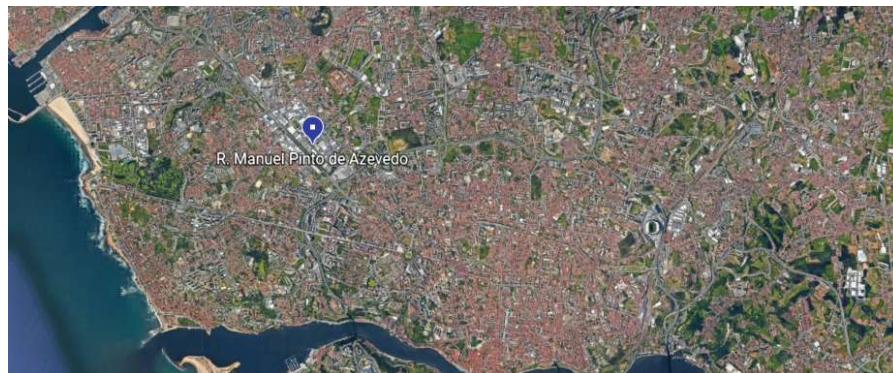


Figura 18 Ponto de partida das rotas (Armazém)<sup>7</sup>

- **Localização dos clientes**

Para a realização do caso de estudo foram geradas 10 instâncias que contêm um número diferente de clientes a ser servidos, localizados dentro dos limites territoriais do município do Porto (Tabela 8). A localização dos clientes (coordenadas) foi obtida de forma aleatória com recurso ao *software* ArcGis, que é um sistema de informação geográfica adequado para analisar mapas e que dispõe de diversas funcionalidades para o utilizador baseadas na localização geográfica. Com a utilização desta ferramenta foi possível determinar a localização dos clientes de forma totalmente aleatória, garantindo a qualidade da amostra e dos resultados obtidos à posteriori.

Para a determinação do número de clientes em cada instância foi utilizada a função aleatória do Excel, com a restrição ao nível do número mínimo (um cliente) e máximo de clientes (vinte clientes) de cada instância.

Tabela 8 Definição do número de clientes por instância

Instância	Número de clientes
1	5
2	4
3	12
4	16
5	6
6	11
7	9
8	8
9	15
10	10

Na Figura 19 é apresentada a título de exemplo a informação relacionada com as coordenadas geográficas, latitude e longitude, dos clientes da instância 1, obtidas no *software* ArcGis.

<sup>7</sup> Figura retirada do *Google Earth*

Latitude	Longitude	Clientes
41,143729	-8,577624	A
41,168081	-8,645031	B
41,148634	-8,624753	C
41,149038	-8,602082	D
41,164888	-8,687899	E

Figura 19 Coordenadas da localização dos clientes

A Figura 20 apresenta a localização geográfica dos clientes da instância 1, que se encontram distribuídos por toda a área do município do Porto.

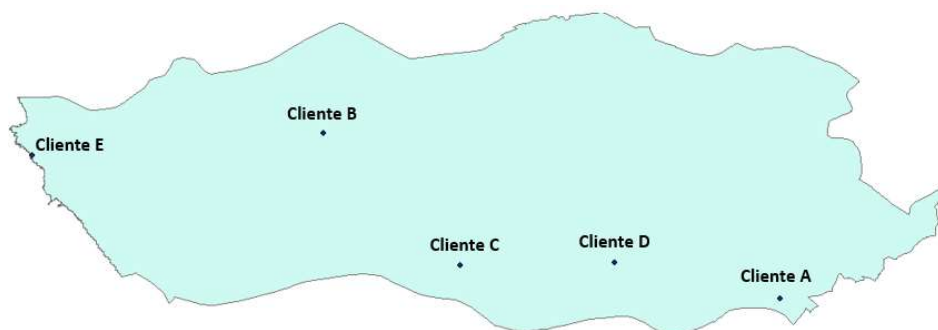


Figura 20 Localização geográfica dos clientes no município do Porto <sup>8</sup>

- **Cálculo das distâncias**

Após a definição da localização dos clientes e do ponto de partida das rotas (armazém), é possível desenvolver-se uma matriz de distâncias que indica a distância em km, entre todas as combinações possíveis de clientes e armazém. A Tabela 9 representa a título de exemplo a matriz das distâncias para os clientes da instância 1. Apesar de os clientes estarem dispersos por todo o município, a distância máxima a percorrer pelos veículos será de 15.1 km e no mínimo 950m, relacionado com o cliente B que se encontra localizado nas proximidades do armazém.

A distância exata entre todas as localizações foi obtida com recurso ao serviço online do *Google Maps*, optando sempre pela opção do caminho mais curto que, em alguns casos, não representa o caminho mais rápido. Na implementação do modelo no *software* CPLEX, as distâncias são obtidas de forma automática de acordo com as coordenadas.

Tabela 9 Matriz das distâncias (Km) para os clientes da instância 1

	Armazém	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E
Armazém	-	10.0	0.95	5.1	6.3	5.6
Cliente A	10.0	-	10.0	5.7	4.0	15.1
Cliente B	0.95	10.0	-	4.7	6.0	4.7
Cliente C	5.1	5.7	4.7	-	2.4	7.6
Cliente D	6.3	4.0	6.0	2.4	-	11.5
Cliente E	5.6	15.1	4.7	7.6	11.5	-

<sup>8</sup> Figura obtida no *software* ArcGis

- **Procura dos clientes**

Para a aplicação prática do modelo desenvolvido é também essencial discriminar o peso das encomendas por cliente, dado que influencia o tipo de veículo a utilizar ao nível da capacidade máxima permitida, mas também o número de veículos necessários para assegurar que todos os pedidos dos clientes são satisfeitos. Todas as encomendas dos clientes devem de ser entregues no mesmo dia na respetiva localização do cliente. Na Tabela 10 consta a informação relativa ao peso em Kg das encomendas por cliente, da instância 1. O peso das encomendas de cada cliente foi determinado com recurso à ferramenta Solver do Microsoft Excel, tendo em consideração a capacidade dos três veículos disponíveis e com restrições ao nível do peso total das encomendas por instância. O problema de programação linear desenvolvido para o efeito foi o seguinte:

$$\max z = \sum a_i \quad (53)$$

Sujeito a:

$$\sum a_i \leq \sum b_k \quad (54)$$

$$a_i \leq \text{Max } b_k \quad (55)$$

$$a_i \geq 0 \quad (56)$$

A função objetivo consiste em maximizar o peso total das encomendas, sendo que esse valor não pode ser superior à capacidade total dos três veículos, representado pela primeira restrição. A segunda restrição está relacionada com o facto de o peso da mercadoria de um determinado cliente não poder ser superior à capacidade do veículo que apresenta a maior capacidade. Para assegurar a alocação de todas encomendas aos veículos disponíveis, foi considerado apenas 75% do valor obtido por cliente na função objetivo.

Tabela 10 Peso das encomendas dos clientes da instância 1

Cliente	Peso total da encomenda em Kg
1A	2712
1B	2649
1C	5542
1D	1149
1E	4075

- **Custos fixos e variáveis**

Neste seguimento, existe um custo intrínseco ao processo de distribuição de mercadoria. O custo associado a um terminado troço/ caminho é umas das variáveis do modelo VRP desenvolvido, sendo essencial a sua análise. Para a obtenção deste custo é necessário ter em consideração o custo associado ao tempo de trabalho dos motoristas (custo fixo) e ainda o custo relativo ao combustível consumido pelos veículos nas rotas efetuadas (custo variável).

Para a obtenção dos custos fixos, foi considerado o valor de 8€ de salário/hora. O tempo de trabalho de cada motorista tem em consideração o tempo de viagem entre os clientes e a partida/regresso ao armazém e o tempo de serviço nos clientes. Quanto aos custos variáveis, foi assumido que todos os veículos utilizam como combustível o gasóleo, considerando como referência para o preço médio do gasóleo o valor de 1.41€/L (Pordata, 2019).

- **Custo do ruído**

Neste último ponto é apresentado o detalhe do custo do ruído para a sua inclusão no modelo VRP desenvolvido. Como referido anteriormente, a metodologia utilizada consiste na aplicação de um custo por dB às emissões totais de ruído (ruído de rolamento e propulsão) que se encontram acima dos limites definidos, numa determinada rota.

De acordo com a informação apresentada previamente, o custo do ruído utilizado no presente trabalho é constituído pelo custo de incomodo e de saúde, e tem como referência o período de um ano. Assim, para a utilização destes valores, foi necessário determinar o custo associado a um determinado momento, apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 Preço ambiental do ruído rodoviário para a EU28

$L_{den}$ dB(A)	Custo total (€)	Custo final (€)
50 - 54	17	0.001941
55 - 59	31	0.003539
60 - 64	34	0.003881
65 - 69	63	0.007192
70 - 74	67	0.00765
$\geq 75$	72	0.00822

Como podemos verificar na Figura 21 Representação gráfica do custo do ruído, a equação dos custos de ruído apresenta um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) muito próximo de 1, o que indica que se trata de uma regressão linear simples.

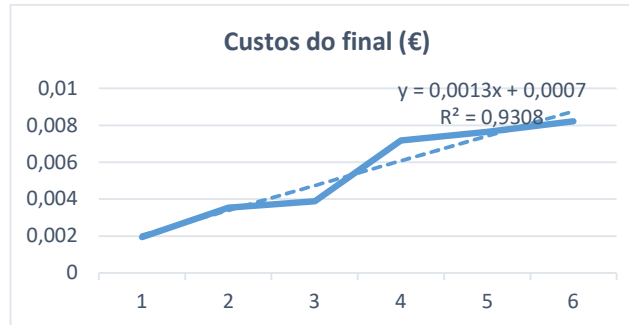


Figura 21 Representação gráfica do custo do ruído

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados da aplicação do modelo desenvolvido. Através da análise aos resultados obtidos é possível compreender se o modelo desenvolvido corresponde ao inicialmente proposto e se os resultados alcançados são mais favoráveis comparativamente ao modelo clássico.

### 4.1. Apresentação de resultados

Os resultados apresentados neste subcapítulo foram obtidos no *software* CPLEX. O modelo clássico e o novo modelo desenvolvido foram implementadas no CPLEX através da utilização da linguagem de programação *Optimization Programming Language* (OPL).

Para a implementação e validação do modelo foi utilizado um computador portátil com o processador Intel® Core™ i3-4005U CPU @ 1.70GHz, 4 GB de RAM e um sistema operativo de 64 bits.

As 10 instâncias foram testadas de acordo com os pressupostos e com a informação apresentada no capítulo anterior (Tabela 12). As mesmas instâncias foram testadas para o modelo desenvolvido e para o modelo clássico, cuja formulação se encontra no Anexo C. O tempo total de execução de cada instância foi limitado a um total de 600 segundos.

Tabela 12 Resumo da informação das instâncias

Instância	Nº de Clientes	Peso Total encomendas (Kg)	Distancia total da rota
1	5	16127	34.52 km
2	4	16130	23.82 km
3	12	16131	33.06km
4	16	16130	79.03 km
5	6	16130	32.60 km
6	11	16130	26.40 km
7	9	16130	32.18 km
8	8	16128	22.36 km
9	15	16130	49.73 km
10	10	16131	30.02 km

De forma a avaliar o desempenho de cada instância foram selecionados os seguintes parâmetros do *output* disponível no CPLEX:

- Número de variáveis;
- Número de restrições;
- Resultado da função objetivo;
- Tempo de execução do modelo (em segundos);
- GAP (%).

Os resultados obtidos dos parâmetros enunciados acima são apresentados na próxima Tabela 13.

Tabela 13 Resultados obtidos no CPLEX dos dois modelos

Instância	Nº de variáveis		Nº de restrições		Função objetivo		Tempo execução (s)		GAP (%)	
	Clássico	Novo	Clássico	Novo	Clássico	Novo	Clássico	Novo	Clássico	Novo
1	3024	3234	16713	16715	69.385	81.468	1.41	1.13	0.00	0.00
2	2025	2165	10722	10724	45.646	56.298	1.06	0.91	0.00	0.00
3	15561	16653	95778	95780	200.638	225.881	196.53	156.92	1.22	0.53
4	27081	28985	170130	170132	331.007	360.302	494.25	457.47	0.38	0.30
5	4221	4515	24030	24032	89.292	102.850	6.66	2.58	0.04	0.00
6	13176	14100	80505	80507	163.805	185.595	172.76	179.78	0.38	0.40
7	9000	9630	53937	53939	139.90	157.701	41.52	35.52	1.16	0.00
8	7209	7713	42642	42644	105.647	122.595	13.22	10.76	0.10	0.00
9	23904	25584	149553	149555	290.353	296.213	600.11	600.16	15.89	7.89
10	10989	11759	66558	66560	155.66	174.932	40.14	34.38	0.00	0.00
<b>Máximo</b>	27081	28985	170130	170132	331.007	360.302	600.11	600.16	15.89	7.89
<b>Mínimo</b>	2025	2165	10722	10724	45.646	56.298	1.06	0.91	0.00	0.00
<b>Média</b>	11619	12433	71056	71058	159.133	176.384	156.766	147.961	1.917	0.912

Na Tabela 14 são apresentadas as rotas obtidas no CPLEX no novo modelo, para cada um dos veículos disponíveis, e para as 10 instâncias em análise. Adicionalmente, é apresentado o custo por instância das três componentes consideradas no custo total e, por sua vez, na função objetivo.

Tabela 14 Rotas obtidas no novo modelo para as 10 instâncias

<b>Instância</b>	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Custo Fixo</b>	<b>Custo Variável</b>	<b>Custo Ruído</b>
1	0-4-0	0-1-0	0-2-3-5-0	44.574	24.789	12.105
2	0-3-0	0-4-0	0-1-2-0	34.797	10.850	10.652
3	0-2-0	0-6-1-5-9-0	0-11-4-7-8-12-3-10-0	100.460	102.18	23.243
4	0-11-5-0	0-7-8-16-9-13-2-0	0-10-1-4-14-3-6-12-15-0	133.33	197.68	29.295
5	0-3-0	0-2-0	0-1-4-5-6-0	51.726	37.566	13.558
6	0-1-0	0-6-11-9-5-0	0-7-4-10-2-3-8-0	91.985	71.82	21.79
7	0-9-0	0-4-3-1-0	0-7-8-2-6-5-0	75.794	63.326	18.401
8	0-7-0	0-8-5-2-0	0-3-6-1-4-0	67.457	38.19	16.947
9	0-11-10-0	0-2-6-8-1-12-0	0-9-7-14-4-13-3-5-15-0	125.24	143.370	27.601
10	0-6-0	0-3-0	0-2-4-5-7-9-1-10-8-0	83.431	72.13	19.731

Na Tabela 15 é apresentado os resultados obtidos no modelo clássico, nomeadamente, o valor obtido para cada instância ao nível do custo fixo e variável. De igual forma, são também apresentadas as rotas obtidas para cada veículo.

Tabela 15 Rotas obtidas no modelo clássico para as 10 instâncias

<b>Instância</b>	<b>Veículo 1</b>	<b>Veículo 2</b>	<b>Veículo 3</b>	<b>Custo Fixo</b>	<b>Custo Variável</b>
1	0-4-0	0-2-1-0	0-3-5-0	44.583	24.755
2	0-3-0	0-4-0	0-1-2-0	34.797	10.85
3	0-2-0	0-6-1-5-9-3-0	0-11-4-7-8-12-10-0	100.46	102.18
4	0-11-5-0	0-7-8-16-9-13-2-0	0-10-1-4-14-3-6-12-15-0	133.34	197.66
5	0-3-0	0-2-0	0-1-4-5-6-0	51.726	37.566
6	0-1-0	0-6-9-11-8-5-0	0-7-4-10-2-3-0	91.985	71.82
7	0-9-0	0-4-3-1-0	0-7-8-2-6-5-0	75.974	63.326
8	0-7-0	0-8-5-2-0	0-3-6-1-4-0	67.457	38.19
9	0-11-0	0-8-7-4-14-10-1-0	0-9-2-6-12-13-3-5-15-0	125.11	201.88
10	0-6-0	0-3-0	0-2-4-5-7-9-1-10-8-0	83.431	72.13

## 4.2. Discussão de resultados

Após a aplicação do modelo desenvolvido no *software* CPLEX e da execução do modelo tendo em conta as características de cada instância, é possível analisar detalhadamente os resultados obtidos nos testes efetuados.

- Número de variáveis

Ao nível do número de variáveis, o modelo clássico apresenta um mínimo de 2025 variáveis relativo à instância 2 e um máximo de 27081 na instância 4. Os valores do novo modelo são dispares do modelo clássico, no entanto, o valor mínimo (2165) e o máximo (28985) são referentes à mesma instância. De forma geral, o modelo desenvolvido apresenta um valor superior de variáveis relativamente ao valor clássico, cerca de 7% em cada instância.

Esta discrepância no número de variáveis está relacionada com o facto de, para o cálculo do nível de ruído, ser necessário acrescentar variáveis adicionais relacionadas com o apuramento dos níveis de ruído de rolamento e de propulsão gerados pelos veículos.

É possível ainda verificar um aumento do número de variáveis, em ambos os modelos, nas instâncias que apresentam o maior número de clientes.

- Número de restrições

Quanto ao número de restrições, não se verificou uma diferença significativa entre o modelo clássico e o novo modelo. No modelo clássico os valores variam entre o mínimo de 10722 e máximo de 170130, sendo que a média das restrições das dez instâncias testadas é de 71056.

Esta semelhança entre os modelos deve-se ao facto de, no novo modelo, existir apenas dois conjuntos de restrições adicionais relacionadas com o ruído gerado pelos veículos nas rotas de distribuição de mercadoria. Estas restrições do novo modelo têm como objetivo calcular o ruído total gerado na rota entre clientes, composto pelo ruído de rolamento e de propulsão.

- Valor da função objetivo

O seguinte parâmetro de avaliação é o resultado da função objetivo. O modelo clássico apresenta uma média de custos totais de 159.133, tendo sido obtido o valor mínimo de 45.646 na instância 2 e o custo máximo na instância 4 de 331.007.

No modelo clássico, os valores foram ligeiramente inferiores face ao novo modelo. Esta situação era expectável uma vez que o novo modelo, além dos custos fixos e variáveis, inclui também os custos do ruído. O valor máximo obtido no novo modelo foi de 360.302 e o valor mínimo de 56.298 nas instâncias 4 e 2, respetivamente. O valor da função objetivo do novo modelo é, em média, 13% superior ao valor do modelo clássico. Nas instâncias que apresentam o maior número de clientes, 4 e 9, a diferença do valor da função objetivo entre os dois modelos é de apenas 2% e 9%, respetivamente. Na instância 3, o aumento dos custos no novo modelo face ao clássico é de apenas 2% enquanto, na instância 2 a diferença é de 23%.

É possível referir que o valor da função objetivo está diretamente relacionado o número de clientes por instância e, conseqüentemente, com a distância total das rotas em ambos os modelos, ou seja, quanto maior a distância da rota maior é o valor dos custos totais.

- Tempo de execução

Neste parâmetro é apresentado o tempo, em segundos, que o processo demorou a executar o modelo até obter uma solução. Nos testes efetuados verificou-se que algumas execuções apresentavam um tempo de execução muito elevado, principalmente nas instâncias que apresentam um número de clientes maior. Assim, foi estabelecido um máximo de 600 segundos, que corresponde a 10 minutos, para o tempo de execução do modelo.

O teste realizado na instância 9, em ambos os modelos, ultrapassou o limite de tempo definido, o que significa que a solução obtida não é a ótima. Nas instâncias 3, 4 e 6 o tempo de execução foi também elevado, apesar de não ter atingido o limite de tempo estabelecido. Nas restantes instâncias, os valores obtidos são de também muito idênticos em ambos os modelos, ainda assim, podemos referir que o novo modelo apresenta um tempo de execução ligeiramente inferior.

- GAP

A informação do GAP dos testes efetuados a cada instância, é mais um importante output obtido no *software* CPLEX, que nos permite avaliar e comparar as soluções obtidas.

O GAP representa a melhor solução possível não inteira, sendo que os seus valores estão expressos em percentagem. Ou seja, se o GAP de uma solução for de 0%, isto significa que a solução obtida é a melhor solução.

Tendo por base os resultados obtidos, podemos referir que foi obtida a solução ótima em 3 das 10 instâncias em análise, em ambos os modelos.

Nas instâncias 5, 7 e 8, apesar de a diferença ser insignificante, o novo modelo apresenta um GAP de 0% e o modelo clássico um GAP inferior a 1.20%. Nas instâncias 3,4 e 6 o valor obtido não foi o ótimo em nenhum dos modelos, ainda assim a diferença é inferior a 1.23%. De uma forma geral, verificou-se que, as instâncias com um tempo de execução mais elevado, apresentam também um GAP superior, em ambos os modelos. O GAP máximo obtido foi de 15.86% no modelo clássico, na instância 9.

Relativamente à Tabela 14 apresentada anteriormente relativa ao novo modelo, onde consta o detalhe das rotas geradas no CPLEX para cada instância e a composição do custo total das rotas, podemos referir o seguinte:

- Da frota de veículos disponível para efetuar a distribuição de mercadoria, o veículo 1 é o que apresenta a menor capacidade e, por isso, é o veículo que apresenta uma alocação menor de clientes;
- O veículo 3 é o veículo que abastece o maior número de clientes numa única rota, cerca de 8 clientes, sendo que este é o veículo que apresenta a maior capacidade;
- Nas 10 instâncias de testes, todos os veículos têm uma rota estabelecida, ou seja, não existe nenhum veículo que não necessite de sair do armazém;
- Em média, 49% dos custos totais das rotas advém dos custos fixos que estão relacionados com a remuneração dos condutores dos veículos pelo tempo de trabalho realizado;
- Os custos variáveis representam, em média, 39% do custo total da rota e o custo do ruído, cerca de 12%.

Na Tabela 15 é apresentado o mesmo tipo de informação que na Tabela 14 mas para o modelo clássico, ou seja, as rotas geradas no CPLEX para cada um dos três veículos disponíveis para a distribuição, bem como o valor para cada uma das componentes do custo das rotas que, no caso do modelo clássico, apenas é constituído pelo custo fixo e pelo custo variável.

Quanto às rotas geradas, foram identificadas diferenças nas instâncias 1, 3, 6 e 9 entre os dois modelos em análise. Além de existir mudanças ao nível da ordem em que cada cliente é visitado, existe também mudança de clientes entre veículos.

No entanto, comparando os resultados obtidos nos dois modelos em termos de custos, existe apenas uma diferença nos custos variáveis da instância 9. Esta instância apresenta um dos maiores volumes de clientes de todas as instâncias utilizadas para testes, sendo que o valor da componente variável apresentou um valor superior no modelo clássico, comparativamente ao modelo desenvolvido.

Adicionalmente, foi efetuada uma análise às variáveis de decisão que constituem a função objetivo do modelo desenvolvido (custo fixo, custo variável e custo do ruído). Esta análise teve por base os dados da instância 1, e consistiu em efetuar uma análise ao *trade-off* entre as três componentes de custos consideradas.

Uma vez que só é possível analisar dois custos em simultâneo, foram efetuadas três análises que correspondem às três combinações possíveis de custos. Para cada combinação, foram determinados os pontos utopia e nadir (Figura 22). O ponto utopia corresponde ao valor mínimo possível e o ponto nadir ao valor máximo, sendo que a fronteira de pareto situa-se entre estes dois pontos. A fronteira de pareto é constituída por todos os pontos cuja solução é ótima, ou seja, onde não é possível obter um melhor valor para um parâmetro sem diminuir o desempenho de outro. Dado que todos os custos que constituem a função objetivo estão calculados em termos monetários, não houve necessidade de normalizar os valores de cada componente.

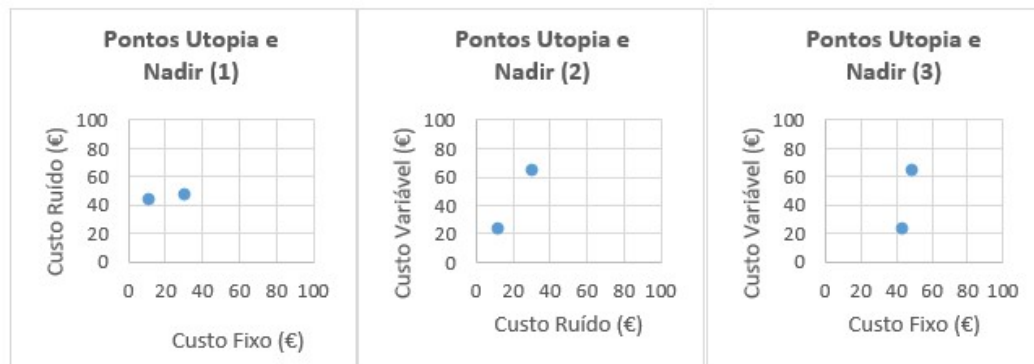


Figura 22 Pontos Utopia e Nadir - Instância 1

Tendo por base esta informação, procedeu-se à aplicação do método de escalarização. Este método consiste em minimizar um componente da função objetivo de cada vez, adicionando uma restrição de desigualdade relativa a outra componente da função objetivo.

A restrição que é adicionada implica que o valor de uma componente da função objetivo seja igual ou inferior ao valor do vetor  $\epsilon$ . Os valores atribuídos a este vetor correspondem a um valor entre o ponto utopia e nadir obtidos anteriormente para a componente da função objetivo em questão. O modelo é executado uma vez por cada valor do vetor  $\epsilon$ . Os resultados obtidos foram os seguintes:

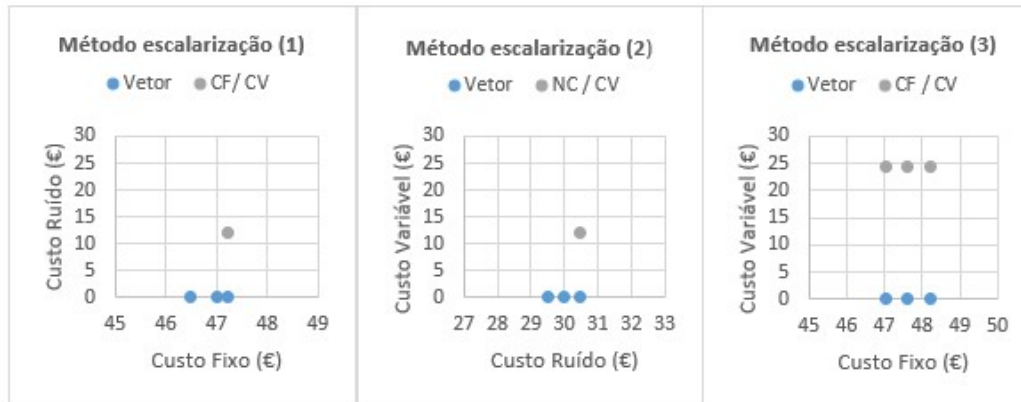


Figura 23 Resultado da aplicação do método de escalarização

Verificou-se que, independentemente do valor do vetor  $\varepsilon$ , a solução obtida é sempre igual para o caso dos custos fixos/custo do ruído e do custo do ruído/custo variável. Este resultado significa que estamos perante um ótimo de pareto.

No caso dos custos fixos/ custos variáveis, apesar de o valor dos custos variáveis se manter constante, o valor da componente do custo fixo variar consoante o valor atribuído ao vetor, o que significa que, neste caso, a solução é um ótimo de pareto fraco.

## 5. CONCLUSÃO

O presente e último capítulo desta dissertação é dedicado à apresentação das principais conclusões obtidas. Após o desenvolvimento do modelo e da análise dos resultados gerados, é possível inferir algumas conclusões sobre o trabalho realizado. Ao longo do seu desenvolvimento foram surgindo alguns entraves que são aqui abordados, bem como a exposição de ideias para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões finais

O trabalho desenvolvido teve como principal objetivo analisar o impacto provocado pelo ruído rodoviário no problema do roteamento de veículos nas cidades urbanas. Além de o ruído causar efeitos negativos na saúde e no bem-estar dos indivíduos expostos, os centros urbanos apresentam uma grande concentração de população e de espaços comerciais.

Tendo por base a formulação matemática do modelo clássico do VRP, foi desenvolvido um novo modelo com a inclusão do custo monetário associado o ruído provocado pelos veículos utilizados para a distribuição de mercadoria. A nova abordagem foi aplicada ao município do Porto, sendo que um dos pressupostos assumidos estava relacionado com a utilização de três veículos distintos ao nível da sua capacidade e dos níveis de ruído emitidos.

Dos resultados obtidos nos testes efetuados às 10 instâncias consideradas no modelo desenvolvido no presente trabalho e no modelo clássico, foi possível efetuar uma análise crítica aos resultados. Tendo por base a revisão de literatura efetuada às diferentes abordagens para a inclusão do ruído no modelo VRP, optou-se por calcular o valor monetário associado ao ruído, para cada trajeto efetuado, e em função das características dos veículos da frota disponível.

Em termos de performance, o modelo clássico apresenta resultados muito similares ao modelo desenvolvido. Ainda assim, tendo em conta o aumento do número de variáveis no modelo desenvolvido, os resultados foram bastante positivos dado que foi possível obter uma solução, para cada instância, num tempo razoável e com um GAP muito reduzido.

Tendo em consideração os três tipos de custos considerados nas rotas dos veículos (custo fixo, custo variável e custo do ruído), o custo fixo representa, em média, 50% dos custos totais. Apesar de o custo do ruído ser o que causa um menor impacto nos custos totais, o seu peso ainda é significativo (12% dos custos totais) e tem impacto nas rotas definidas. Assim, podemos inferir que, no caso particular da cidade do porto, o ruído tem impacto no modelo de roteamento de veículos.

Face à crescente urbanização das cidades e ao impacto no ruído nos indivíduos, foi demonstrado no presente trabalho que, sempre que a informação necessária esteja disponível, é possível incluir o ruído no modelo VRP. A sua inclusão não demonstrou ser um entrave em termos de performance e é uma forma de minimizar os possíveis impactos do ruído.

### 5.2. Limitações e investigação futura

No decorrer da realização do presente trabalho foram surgindo algumas limitações ao desenvolvimento do mesmo que, naturalmente, afetavam o cumprimento do objetivo principal. O primeiro entrave surgiu no momento da pesquisa de informação bibliográfica relacionada com a

inclusão do ruído no modelo matemático do problema de roteamento de veículos. Alguns dos artigos disponíveis sobre o tema apresentavam carência de informação sobre a metodologia utilizada para a inclusão desta variável no modelo. Face à falta de informação disponível, a segunda limitação esteve relacionada com o desenvolvimento da nova abordagem e do novo modelo, dado que era necessário que assegurar que o trabalho desenvolvido ia de encontro ao objetivo estabelecido.

Em futuros trabalhos relacionados com este tema, será interessante adaptar o modelo a um problema de roteamento de veículos de dois níveis (2E-VRP). Este é um problema relacionado também com a distribuição de mercadoria nas cidades, sendo que a rede de distribuição está dividida em dois níveis. Este é um problema que tem subjacente a utilização de veículos de pequenas dimensões, com baixa capacidade e ecológicos para efetuar a entrega de mercadoria aos clientes na fase final do trajeto, e ainda uma nova forma de consolidar e distribuir todas as mercadorias de uma determinada área.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Europeia do Ambiente. (2013). *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing*. Obtido de <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22079109>
- Agência Europeia do Ambiente. (2015). *Noise*. Obtido de <https://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/noise#tab-interactive-charts>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2004). *O Ruído e a Cidade*. Obtido de [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/DAR/Ruido/o\\_rudo\\_e\\_a\\_cidade.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/o_rudo_e_a_cidade.pdf)
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). *Mapas estratégicos de ruído e população exposta em aglomerações*. Obtido de [https://apambiente.pt/\\_zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/MapasAglomeracoes/MER\\_Agg\\_janeiro2019\\_2.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/MapasAglomeracoes/MER_Agg_janeiro2019_2.pdf)
- Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2019). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and 'grey zone' customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- Antònia Barceló, M., Varga, D., Tobias, A., Diaz, J., Linares, C., & Saez, M. (2016). Long term effects of traffic noise on mortality in the city of Barcelona, 2004–2007. *Environmental Research*, 147, 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.010>
- Arbache, F. S. (2011). *Gestão de logística, distribuição e trade marketing* (4ª Edição). Obtido de [https://books.google.pt/books/about/Gestão\\_de\\_logística\\_distribuição\\_e\\_t.html?id=1RyHCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp\\_read\\_button&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books/about/Gestão_de_logística_distribuição_e_t.html?id=1RyHCgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Ballot, E., Gobet, O., & Montreuil, B. (2012). Physical internet enabled open hub network design for distributed networked operations. *Studies in Computational Intelligence*, 402, 279–292. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27449-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27449-7_21)
- Balm, S., Moolenburg, E., Anand, N., & Ploos Van Amstel, W. (2017). The potential of light electric vehicles for specific freight flows. *Transportation Science*. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Bickel, P., Friedrich, R., Link, H., Stewart, L., & Nash, C. (2006). Introducing environmental externalities into transport pricing: Measurement and implications. *Transport Reviews*, 26(4), 389–415. <https://doi.org/10.1080/01441640600602039>
- Bramel, J., & Simchi-Levi, D. (1997). *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*. (Vol. 50). <https://doi.org/10.2307/3010573>
- Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552–564. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00238-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00238-8)
- Câmara Municipal do Porto. (2015). *Relatório sobre o Estado do Ordenamento do Território*. Obtido de <https://pdm.cm-porto.pt>
- Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>
- Cattaruzza, D., Gonzalez-Feliu, J., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). *Vehicle Routing Problems for City Logistics*. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0074-0>

- Chao, I.-M., & Liou, T.-S. (2005). A New Tabu Search Heuristic for the Site-Dependent Vehicle Routing Problem. Em *The Next Wave in Computing, Optimization, and Decision Technologies* (pp. 107–119). [https://doi.org/10.1007/0-387-23529-9\\_8](https://doi.org/10.1007/0-387-23529-9_8)
- Chiu, H. N. (1995). The integrated logistics management system: a framework and case study. Em *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* (Vol. 25). Obtido de <https://doi.org/10.1108/09600039510093249>
- Ćirović, G., Pamučar, D., & Božanić, D. (2014). Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4245–4258. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.01.005>
- Comissão Europeia. (2003). *External Costs - Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*. Obtido de [http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo_en.html)
- Comissão Europeia. (2011). *Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. Obtido de <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF>
- Comissão Europeia. (2019). *Handbook on the external costs of transport: Version 2019*. <https://doi.org/10.2832/27212>
- Council of Supply Chain Management Professional. (2020). Council of Supply Chain Management Professional Definitions and Glossary. Obtido 25 de Janeiro de 2020, de [https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., Storchi, G., Benjelloun, A., Feliu, J. G., Cauquil, L., & Mancini, S. (2009). Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Daskin, M. S. (1985). Logistics: An overview of the state of the art and perspectives on future research. *Transportation Research Part A: General*, 19(5–6), 383–398. Obtido de [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(85\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0191-2607(85)90036-6)
- Decreto-Lei n.º 132/2017 de 11 de Outubro. , Diário da República n.º 196/2017, Série I. Lisboa: Planeamento e das Infraestruturas.
- Defra. (2005). *The Social Cost of Carbon The Social Costs of Carbon (SCC) Review-Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment Final Report*. Obtido de [www.defra.gov.uk](http://www.defra.gov.uk)
- Department for Environment Food & Rural Affairs. (2014). *Environmental Noise: Valuing impacts on: sleep disturbance, annoyance, hypertension, productivity and quiet*. Obtido de [www.gov.uk/defra](http://www.gov.uk/defra)
- Dias, F. (2020). Porto (Distrito) - Visitar Portugal. Obtido 24 de Janeiro de 2021, de <https://www.visitportugal.pt/porto>
- Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Junho de 2002 relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. Diário Oficial das Comunidades Europeias, L189/12-25. 18 de Julho de 2002.
- Ecommerce Europe. (2019). *European Ecommerce Report* . Obtido de [www.ecommerce-europe.eu](http://www.ecommerce-europe.eu)
- Eguia, I., Racero, J., & Guerrero, F. (2012). Evaluating vehicle routing problems with sustainability costs. *ICORES 2012 - Proceedings of the 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, 175–180. <https://doi.org/10.5220/0003760601750180>

- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100–114.  
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Feng, Y., Zhang, R. Q., & Jia, G. (2017). Vehicle Routing Problems with Fuel Consumption and Stochastic Travel Speeds. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1–16.  
<https://doi.org/10.1155/2017/6329203>
- Fiori, C., & Marzano, V. (2018). Modelling energy consumption of electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 658–673.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.020>
- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81–99.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.049>
- Hans, J., Sandberg, U., Blokland, G., Ejsmont, J., Watts, G., & Luminari, M. (2004). *Harmonoise. Work package 1.1. Deliverable 9: Source modelling of road vehicles*. Obtido de [http://www.imagine-project.org/bestanden/D09\\_WP1.1\\_HAR11TR-041210-SP10.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/D09_WP1.1_HAR11TR-041210-SP10.pdf)
- INFRAS, CE Delft, ISI, & University of Gdansk. (2007). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector (Version 1.0)*. Obtido de [www.ce.nl](http://www.ce.nl)
- INFRAS, CE Delft, ISI, & University of Gdansk. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector (Version 1.1)*. Obtido de [www.ce.nl](http://www.ce.nl)
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. <https://doi.org/10.2788/31776i>
- Kim, G., Ong, S., Heng, C. K., Tan, S., & Zhang, N. A. (2015). City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 1654–1666.  
<https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2395536>
- Leggieri, V., & Haouari, M. (2017). A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E journal*. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.003>
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1118–1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
- Lu, H. (2012). Distribution network design with considering externality. *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, ICICEE 2012*, 1057–1060. <https://doi.org/10.1109/ICICEE.2012.279>
- Maslarić, M., Nikoličić, S., & Mirčetić, D. (2016). Logistics Response to the Industry 4.0: The Physical Internet. *Open Engineering*, 6(1), 511–517. <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0073>
- Mears-Young, B., & Jackson, M. C. (1997). Integrated Logistic - Call in the Revolutionaries! *Em Int. J. Mgmt Sci* (Vol. 25). Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/330967400>
- Melaina, M. W., Bremson, J., & Melaina, M. (2008). Refueling availability for alternative fuel vehicle markets: Sufficient urban station coverage. *Energy Policy*, 36, 3233–3241.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.025>
- Melo, S., & Baptista, P. (2017). *Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries*.  
<https://doi.org/10.1007/s12544-017-0246-8>
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G. (2016). A multi-space sampling heuristic

- for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.009>
- Montreuil, B. (2011). *Towards a Physical Internet: Meeting the Global Logistics Sustainability Grand Challenge*. Obtido de [www.cirrelt.ca](http://www.cirrelt.ca)
- Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2010). Towards a Physical Internet: the impact on logistics facilities and material handling systems design and innovation. *Progress in material handling research*, 305–327. Obtido de [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2010/40](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2010/40)
- Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2012). Physical Internet Foundations. Em *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics* (pp. 1–16). [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-35852-4\\_10](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-35852-4_10)
- Moolenburgh, E. A., Van Duin, J. H. R., Balm, S., Van Altenburg, M., & Van Amstel, W. P. (2020). Logistics concepts for light electric freight vehicles: A multiple case study from the Netherlands. *Transportation Research Procedia*, 46, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.194>
- Neto, J. Q. F., Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Nunen, J. A., & van Heck, H. W. G. M. (2006). Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks. *International journal of production economics*, 111(2), 195–208.
- Öhrström, E., Skånberg, A., Svensson, H., & Gidlöf-Gunnarsson, A. (2006). Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. *Journal of Sound and Vibration*, 295(1–2), 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.034>
- Organização Mundial da Saúde. (2011). *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Obtido de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/326424>
- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico. (2003). *Delivering the Goods*. Obtido de [www.oecd.org](http://www.oecd.org)
- Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Obtido de [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=26kAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT10&dq=Pigou,+A.+C.+\(1920\).+The+economics+of+welfare.+London:+Macmillan.&ots=z8vajL0Dib&sig=8iX3PEaHh39fvTbAlI8gLMxByY&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Pigou%2C+A.+C.+\(1920\)](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=26kAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT10&dq=Pigou,+A.+C.+(1920).+The+economics+of+welfare.+London:+Macmillan.&ots=z8vajL0Dib&sig=8iX3PEaHh39fvTbAlI8gLMxByY&redir_esc=y#v=onepage&q=Pigou%2C+A.+C.+(1920))
- Ploos Van Amstel, W., & Balm, S. (2016). *Dutch research on business models for light electric vehicles in city logistics*. Obtido de [https://www.researchgate.net/publication/308339229\\_Dutch\\_research\\_on\\_business\\_models\\_for\\_light\\_electric\\_vehicles\\_in\\_city\\_logistics](https://www.researchgate.net/publication/308339229_Dutch_research_on_business_models_for_light_electric_vehicles_in_city_logistics)
- Ploos Van Amstel, W., Balm, S., Warmerdam, J., & Boerema, M. (2018). *LEFV-LOGIC: Research On Light Electric Freight Vehicles*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/327345378>
- Pordata. (2019). Preços médios de venda ao público dos combustíveis líquidos e gasosos – Continente. Obtido 19 de Dezembro de 2020, de <https://www.pordata.pt/Portugal/Preços+médios+de+venda+ao+público+dos+combustíveis+líquidos+e+gasosos+--+Continente-1265>
- Renaud, J., Laporte, G., & Boctor, F. F. (1996). A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 23(3), 229–235. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(95\)00026-P](https://doi.org/10.1016/0305-0548(95)00026-P)
- Russo, F., & Comi, A. (2010). A classification of city logistics measures and connected impacts. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6355–6365.

- <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.044>
- Savelsbergh, M., Vigo, D., Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Savelsbergh, M. W. P. (2007). *Vehicle Routing*. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/233843551>
- Sawik, B., Faulin, J., & Pérez-Bernabeu, E. (2017). A Multicriteria Analysis for the Green VRP: A Case Discussion for the Distribution Problem of a Spanish Retailer ScienceDirect A Multicriteria Analysis for the Green VRP: A Case Discussion for the Distribution Problem of a Spanish Retailer. *Transportation Research Procedia*, 22, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.037>
- Serrano-Hernández, A., Álvarez, P., Lerga, I., Reyes-Rubiano, L., & Faulin, J. (2017). Pricing and Internalizing Noise Externalities in Road Freight Transportation. *Transportation Research Procedia*, 27, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.059>
- Stephan, K., & Boysen, N. (2011). Cross-docking. *J Manag Control*, 22, 129–137. <https://doi.org/10.1007/s00187-011-0124-9>
- The World Bank. (2018). Urban population growth (annual %) - European Union | Data. Obtido 17 de Maio de 2020, de [https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.GROW?locations=EU&most\\_recent\\_value\\_desc=false](https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.GROW?locations=EU&most_recent_value_desc=false)
- Watts, G. R. (2005). Harmonise prediction model for road traffic noise. *Transport Research Laboratory*, 73. Obtido de [https://www.researchgate.net/publication/274706130\\_Harmonise\\_prediction\\_model\\_for\\_road\\_traffic\\_noise](https://www.researchgate.net/publication/274706130_Harmonise_prediction_model_for_road_traffic_noise)
- Wen, M., Larsen, J., Clausen, J., Cordeau, J., & Laporte, G. (2009). Vehicle routing with cross-docking. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 1708–1718. <https://doi.org/10.1057/jors.2008.108>
- Yeh, C. F. (2013). Evaluation methods for external costs for road traffic based on objective territorialization in the metropolis. *Cities*, Vol. 31, pp. 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.002>

## ANEXO A

Tabela 16 Coeficientes do ruído de rolamento  
(Hans et al., 2004)

	Veículos leves		Veículos semipesados		Veículos pesados	
	$a_R$	$b_R$	$a_R$	$b_R$	$a_R$	$b_R$
25	69,9	33	76,5	33	79,5	33
31,5	69,9	33	76,5	33	79,5	33
40	69,9	33	76,5	33	79,5	33
50	74,9	30	78,5	30	81,5	30
63	74,9	30	79,5	30	82,5	30
80	74,9	30	79,5	30	82,5	30
100	79,3	41	82,5	41	85,5	41
125	82,5	41,2	84,3	41,2	87,3	41,2
160	81,3	42,3	84,7	42,3	87,7	42,3
200	80,9	41,8	84,3	41,8	87,3	41,8
250	78,9	38,6	87,4	38,6	90,4	38,6
315	78,8	35,5	88,2	35,5	91,2	35,5
400	80,5	31,7	92	31,7	95	31,7
500	85,7	21,5	94,1	21,5	97,1	21,5
630	87,7	21,2	93,8	21,2	96,8	21,2
800	89,2	23,5	94,4	23,5	97,4	23,5
1000	90,6	29,1	92,2	29,1	95,2	29,1
1250	89,9	33,5	89,6	33,5	92,6	33,5
1600	89,4	34,1	88,9	34,1	91,9	34,1
2000	87,6	35,1	86,5	35,1	89,5	35,1
2500	85,6	36,4	83,1	36,4	86,1	36,4
3150	82,5	37,4	81,1	37,4	84,1	37,4
4000	79,6	38,9	79,2	38,9	82,2	38,9
5000	76,8	39,7	77,3	39,7	80,3	39,7
6300	74,5	39,7	77,3	39,7	80,3	39,7
8000	71,9	39,7	77,3	39,7	80,3	39,7
10000	69	39,7	77,3	39,7	80,3	39,7

## ANEXO B

Tabela 17 Coeficientes do ruído de propulsão  
(Hans et al., 2004)

	Veículos leves		Veículos semipesados		Veículos pesados	
	$a_p$	$b_p$	$a_p$	$b_p$	$a_p$	$b_p$
25	86	0	97	0	98	0
31,5	88	0	98	0	97	0
40	88	0	99	0	98	0
50	88	0	99	0	103	0
63	97	0	102	0	110	0
80	97	0	101	0	105	0
100	92	0	97	0	101	0
125	87	0	97	0	101	0
160	87	0	95	0	100	0
200	85	0	100	0	102	0
250	86	8,2	101	8,5	104	8,5
315	86	8,2	101	8,5	104	8,5
400	86	8,2	98	8,5	102	8,5
500	81	8,2	94	8,5	99	8,5
630	80	8,2	92	8,5	99	8,5
800	78	8,2	92	8,5	95	8,5
1000	78	8,2	94	8,5	96	8,5
1250	81	8,2	94	8,5	95	8,5
1600	82	8,2	95	8,5	94	8,5
2000	83	8,2	95	8,5	94	8,5
2500	82	8,2	93	8,5	93	8,5
3150	81	8,2	91	8,5	92	8,5
4000	79	8,2	89	8,5	91	8,5
5000	77	8,2	87	8,5	88	8,5
6300	76	8,2	85	8,5	88	8,5
8000	74	8,2	84	8,5	82	8,5
10000	72	8,2	83	8,5	80	8,5

## ANEXO C

O modelo clássico do VRP é o seguinte:

$$\min = FC + VC \quad (57)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq 1 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (58)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij}^k - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ji}^k = 0 \quad (k = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (59)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n x_{ij}^k = 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (60)$$

$$\sum_i a_i y_i^k \leq b_k \quad (k = 1, \dots, m) \quad (61)$$

$$\sum_k y_i^k = \begin{cases} k, & i = 0 \\ 1, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (62)$$

$$\sum_j x_{ij}^k = y_i^k \quad (i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (63)$$

$$\sum_i x_{ij}^k = y_j^k \quad (j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (64)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n f_{ji}^k - \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n f_{ij}^k = a_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (65)$$

$$f_{ij}^k \leq (b_k - a_i) x_{ij}^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (66)$$

$$a_j x_{ij}^k \leq f_{ij}^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (67)$$

$$f_{i0}^k \leq 0 \quad (i = 1, \dots, n; 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (68)$$

$$z_j^k \geq (e_j + t_{ij}) * V_{ij}^{rk} \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (69)$$

$$z_j^k \leq (l_j - s_j^k) * y_j^k \quad (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (70)$$

$$z_i^k + s_i^k + (t_{ij} * V_{ij}^{rk}) - T^k (1 - x_{ij}^k) \leq z_j^k \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m;) \quad (71)$$

$$z_j^k \leq T^k - (t_{j0} * V_{j0}^{rk}) - (s_j^k * y_i^k) \quad (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (72)$$

$$t_{ij} * V_{ij}^{rk} \leq z_j^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (73)$$

$$w_0^k = 0 \quad (k = 1, \dots, m) \quad (74)$$

$$w_i^k = z_i^k + s_i^k \quad (k = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (75)$$

$$(t_{j0} * V_{j0}^{rk}) + z_j^k + (s_j^k * y_i^k) \leq T^k \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; j \neq i; k = 1, \dots, m) \quad (76)$$

$$z_0^k \geq z_j^k + (s_j^k * y_i^k) + (t_{j0} * V_{j0}^{rk}) \quad (i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (77)$$

$$\sum_R V_{ij}^{rk} = x_{ij}^k \quad (78)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad (i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (79)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (80)$$