

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Avaliação de ciclo de vida de sistemas alternativos para transporte urbano e suburbano em Coimbra**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

## **Life Cycle Assessment of alternative systems for urban and suburban transport in the city of Coimbra**

**Autor**

**Gonçalo Gonçalves de Pinho Felgueiras**

**Orientadores**

**Fausto Miguel Cereja Seixas Freire**

**Pedro Augusto Marques**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Joaquim da Costa  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor João Manuel Nogueira Malça de Matos  
Ferreira  
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

---

**Coimbra, setembro, 2016**



Todas as vitórias ocultam uma abdicação.

Simone de Beauvoir, em *Mémoires d'une jeune fille rangée*, 1958.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao professor Doutor Fausto Freire por me ter dado a oportunidade de realizar esta dissertação, trabalhar nesta área e por toda a ajuda concedida.

Ao meu coorientador Mestre Pedro Marques por toda a disponibilidade, ajuda, conselhos e transmissão de conhecimentos constante.

Aos meus pais pela educação que me deram e por todo o esforço e sacrifício que tiveram para me dar todas as ferramentas para alcançar os meus sonhos.

Aos meus avós pelos ensinamentos e carinho com que me presentearam ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos pela amizade, vivências e conselhos.

À Susana por toda a paciência, apoio e suporte que me deu e tem dado e por todo o amor transmitido que me fez superar tudo e alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos GRT por todos os momentos passados juntos, ajuda, amizade e confiança.

Aos meus amigos académicos e aos encontrados na cidade de Coimbra por todas as experiências partilhadas ao longo destes cinco anos.



## Resumo

As crescentes necessidades de mobilidade, resultantes do aumento populacional, levaram à necessidade de estudar soluções e alternativas para o transporte de passageiros. O uso predominante de petróleo como base dos combustíveis contribui significativamente para a poluição do ar e emissão de gases com efeito de estufa. Desta forma, torna-se necessário promover uma mudança no paradigma energético, no sentido de reduzir a dependência do uso de combustíveis fósseis e os impactes ambientais associados à utilização dos meios de transporte.

A presente dissertação apresenta um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de sistemas alternativos para transporte urbano e suburbano na cidade de Coimbra, com o objetivo de comparar ambientalmente diferentes tipos de meios de transporte de passageiros. São avaliados veículos ligeiros e pesados (rodoviários e ferroviários), integrando diferentes tecnologias (diesel, gasolina, GPL, gás natural e elétrica). Adicionalmente, apresenta-se uma análise ao percurso suburbano Serpins-Coimbra, incluindo a possibilidade de deslocação pela via atual ou a reativação da linha de comboio, que liga os dois locais. Realiza-se ainda uma análise de sensibilidade às taxas de ocupação dos meios de transporte, com o objetivo de avaliar a sua influência nos resultados.

A metodologia adotada foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite calcular os potenciais impactes ambientais de um produto/serviço, utilizando o método ReCiPe para avaliar sete categorias de impacto ambiental: aquecimento global, depleção fóssil, depleção metálica, acidificação terrestre,  $PM_{10}$ , eutrofização de água doce e eutrofização marinha.

Os resultados relativos aos meios urbano e suburbano mostram que o veículo pesado elétrico apresenta, de uma forma geral, resultados mais favoráveis, pois apresenta menores impactes ambientais nas categorias de aquecimento global, depleção fóssil, acidificação terrestre, matéria particulada ( $PM_{10}$ ) e eutrofização marinha. Para o meio urbano, os veículos elétricos apresentam impactes inferiores aos veículos de combustão interna (ICEVs) para todas as categorias ambientais, exceto na eutrofização de água doce. O veículo pesado elétrico apresenta os menores impactes nas categorias de aquecimento global, acidificação terrestre, eutrofização marinha e  $PM_{10}$ . Já o veículo ligeiro elétrico apresenta os melhores

resultados para a categoria de depleção fóssil e o troleicarro para a categoria de depleção metálica. No meio suburbano, o veículo pesado diesel apresenta os menores impactos para as categorias de depleção metálica, acidificação terrestre e eutrofização de água doce. Por outro lado, o *Bus Rapid Transit* (BRT) elétrico (veículo pesado elétrico) apresenta os melhores resultados para as restantes categorias de impacto ambiental.

O trajeto Serpins-Coimbra foi avaliado para as categorias de aquecimento global e depleção fóssil. As conclusões mostram que o BRT elétrico é o que apresenta impactos menores para ambas as categorias ambientais, realizando a viagem através da antiga via ferroviária, considerando que a via foi alcatroada. Por outro lado, o veículo ligeiro a gasolina apresenta os maiores impactos ambientais para ambas as categorias, percorrendo o trajeto via estrada nacional.

Os veículos ferroviários apresentam impactos ambientais elevados, principalmente devido à contribuição das infraestruturas de circulação destes meios de transporte para as diferentes categorias de impacto. Esta contribuição é particularmente elevada porque estes veículos realizam o transporte numa via construída especificamente para a circulação num único percurso (11 viagens/dia). Assim, todos os impactos da construção, manutenção e deposição da infraestrutura de circulação estão alocados apenas ao próprio veículo.

A análise de sensibilidade às taxas de ocupação, realizada para o aquecimento global e depleção fóssil, mostra que os meios de transporte pesados rodoviários permitem o transporte de pessoas com menor impacto ambiental do que os veículos ligeiros. Isto porque os veículos ligeiros apenas podem transportar cinco pessoas no máximo. Apesar dos impactos ambientais de deslocação de um veículo pesado serem maiores do que os de um veículo ligeiro, o transporte de uma pessoa num veículo pesado é realizado com menores impactos, a partir de ocupações entre 20 e 31 pessoas por veículo (mediante o tipo de veículo e a categoria de impacto ambiental considerada).

**Palavras-chave:** Meios de Transporte Urbano e Suburbano, Avaliação de Ciclo de Vida, Veículo Ligeiro, Veículo Pesado, Elétrico, Gasolina, Gás Natural, Diesel, Troleicarro, Tram-train, Automotora, Energia, Análise Ambiental.

## **Abstract**

The growing transportation needs, created by a growing population, require that different alternatives and solutions for passenger transport are considered. The predominant use of petroleum-based fuels is a significant factor for air pollution and greenhouse gases emissions. Thus, a change in the energy paradigm is necessary as a way to reduce our dependency on fossil fuels and to ensure the reduction of the environmental impacts associated with transportation.

This dissertation performs a Life Cycle Assessment of alternative systems for urban and suburban transport in the city of Coimbra, with the purpose of comparing the environmental impacts of different types and means of passenger transport. The analysis focuses on light commercial vehicles and heavy-duty buses and railways, integrating different types of technologies (diesel, gasoline, LPG, natural gas and electric). In addition, this dissertation analyses the suburban route Serpins-Coimbra, including the possibility of transport via the current route (by national road) or through the reactivation of the train line that connects the two locations. A sensitivity analysis of the occupancy rate of these means of transport is also performed in order to access its influence in the results.

In this study, the Life-Cycle Assessment (LCA) methodology was used, which allows for the identification of the potential environmental impacts of a product/service, and ReCiPe was the life-cycle impact assessment method applied to evaluate seven different categories of environmental impact: global warming, fossil depletion, metal depletion, terrestrial acidification, particulate matter (PM10), freshwater eutrophication and marine eutrophication.

Results for the urban and suburban means of transport show that the electric buses are the ones that generally show more favourable results, since it is the mean of transport that has the lowest environmental impact in the categories of global warming, fossil depletion, terrestrial acidification, PM10 and marine eutrophication. For urban areas, electric vehicles have lower environmental impacts when compared to internal combustion vehicles (ICEVs) for all categories except freshwater eutrophication. The electric buses show the lowest impacts in the categories of global warming, terrestrial acidification, marine eutrophication and PM10. On the other hand, the light electric vehicle has the best results in

the category of fossil depletion and the trolley buses in the category of metal depletion. In suburban areas, the heavy-duty diesel vehicle shows the lowest impact for the categories of metal depletion, terrestrial acidification and freshwater eutrophication, while the electric Bus Rapid Transit (BRT) shows the best results in all the other categories.

The Serpins-Coimbra route was assessed for global warming and fossil depletion categories. Results show that the electric BRT (heavy-duty electric vehicle) is the mean of transport that shows the lowest environmental impact for both categories when making the journey through the old railway, assuming that the route had been paved over. In contrast, the light vehicle using gasoline has the highest environmental impacts in both categories when following the current route via national road.

Rail vehicles show higher environmental impacts, mainly due to the significant burden of the transport infrastructure for the different categories of environmental impact. Their effect is particularly high because rail transportation requires the construction of a dedicated track (11 travels/day). Thus, all the environmental impacts related to construction, maintenance and deposition of the rail infrastructure are allocated to a single mean of transport.

The sensitivity analysis of the occupancy rate, performed for the categories of global warming and fossil depletion, reveals that heavy-duty road vehicles can transport people with a lower environmental impact than light road vehicles. This is because light vehicles can only transport a maximum of five passengers. Even though the travel impact of a heavy-duty vehicle is higher than that of a light-duty one, transporting one single passenger has lower environmental impacts when a heavy-duty vehicle is used with a minimum occupancy ranging from 20 to 31 passengers per vehicle (depending on the type of vehicle and the environmental impact category considered).

**Keywords** Urban and Suburban Transport, Life Cycle Assessment, Light-duty Vehicle, Heavy-duty vehicle, Electric, Gasoline, Natural Gas, Diesel, Trolley bus, Tram-train, Automotive, Energy, Environmental Analysis.

## Índice

Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	ix
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	5
2. MODELO E INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA .....	8
2.1. Metodologia: Avaliação de Ciclo de Vida.....	8
2.2. Definição do objetivo e âmbito da ACV .....	8
2.3. Caracterização dos Meios de Transporte .....	10
2.3.1. Transporte urbano.....	10
2.3.2. Transporte suburbano .....	13
2.3.3. Utilização e manutenção da estrada e ferrovia .....	17
2.4. <i>Mix</i> de geração de eletricidade.....	17
3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA .....	19
3.1. Descrição do Método de Impacte Ambiental.....	19
3.2. Análise Ambiental .....	20
3.2.1. Análise urbana .....	20
3.2.2. Análise suburbana .....	28
3.2.3. Análise suburbana: caso de estudo percurso Serpins-Coimbra.....	36
3.3. Análise de Sensibilidade .....	38
4. CONCLUSÕES .....	43
4.1. Principais limitações e Trabalho Futuro .....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
ANEXO A - Resultados do potencial de aquecimento global para todas as tecnologias....	51
ANEXO B - Resultados da depleção fóssil para todas as tecnologias .....	52
ANEXO C - Resultados da depleção metálica para todas as tecnologias .....	53
ANEXO D - Resultados da acidificação terrestre para todas as tecnologias .....	54
ANEXO E - Resultados da PM <sub>10</sub> para todas as tecnologias.....	55
ANEXO F - Resultados da eutrofização de água doce para todas as tecnologias.....	56
ANEXO G - Resultados da eutrofização marinha para todas as tecnologias.....	57
ANEXO H – Características dos combustíveis .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fronteiras do sistema de ciclo de vida .....	9
Figura 2 - Potencial de aquecimento global dos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	20
Figura 3 - Depleção fóssil causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	22
Figura 4 – Depleção metálica causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	23
Figura 5 - Acidificação terrestre causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	24
Figura 6 – Matéria particulada libertada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	25
Figura 7 - Eutrofização de água doce causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	26
Figura 8 - Eutrofização marinha causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6) .....	27
Figura 9 - Potencial de aquecimento global dos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	29
Figura 10 - Depleção fóssil causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	30
Figura 11 - Depleção metálica causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	31
Figura 12 - Acidificação terrestre causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	32
Figura 13 - Matéria particulada libertada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	33
Figura 14 - Eutrofização de água doce causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	34
Figura 15 - Eutrofização marinha causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	35
Figura 16 - Aquecimento global causado pelos veículos numa viagem Serpins-Coimbra (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	36
Figura 17 - Depleção fóssil causada pelos veículos numa viagem Serpins-Coimbra (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80) .....	37
Figura 18 - Potencial de aquecimento global dos veículos urbanos, para diferentes ocupações .....	39

Figura 19 - Depleção fóssil causada pelos veículos urbanos, para diferentes ocupações ...	40
Figura 20 – Potencial de aquecimento global dos veículos suburbanos, para diferentes ocupações .....	41
Figura 21 - Depleção fóssil causada pelos veículos suburbanos, para diferentes ocupações .....	42

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do estado da arte mais relevante para esta dissertação.....	2
Tabela 2 - Veículos e tecnologias analisadas .....	6
Tabela 3 – Características dos veículos urbanos .....	11
Tabela 4 – Características dos veículos suburbanos.....	14
Tabela 5 – <i>Mix</i> elétrico (média portuguesa de 2010 a 2014) .....	18
Tabela 6 - Categorias de impacte ambiental analisadas (método ReCiPe) .....	19
Tabela 7 - Ocupações urbanas e suburbanas estudadas na análise de sensibilidade .....	38
Tabela 8 – Resultados dos veículos urbanos para a categoria de aquecimento global (g CO <sub>2</sub> eq/pessoa.km).....	51
Tabela 9 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de aquecimento global (g CO <sub>2</sub> eq/pessoa.km) .....	51
Tabela 10 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de depleção fóssil (g petróleo eq/pessoa.km).....	52
Tabela 11 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de depleção fóssil (g petróleo eq/pessoa.km) .....	52
Tabela 12 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de depleção metálica (g Fe eq/pessoa.km).....	53
Tabela 13 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de depleção metálica (g Fe eq/pessoa.km).....	53
Tabela 14 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de acidificação terrestre (g SO <sub>2</sub> eq/pessoa.km).....	54
Tabela 15 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de acidificação terrestre (g SO <sub>2</sub> eq/pessoa.km) .....	54
Tabela 16 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de PM <sub>10</sub> (g PM <sub>10</sub> eq/pessoa.km).....	55
Tabela 17 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de PM <sub>10</sub> (g PM <sub>10</sub> eq/pessoa.km).....	55
Tabela 18 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de eutrofização de água doce (g P eq/pessoa.km) .....	56
Tabela 19 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de eutrofização de água doce (g P eq/pessoa.km).....	56
Tabela 20 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de eutrofização marinha (g N eq/pessoa.km).....	57

Tabela 21 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de eutrofização marinha (g N eq/pessoa.km).....	57
Tabela 22 - Características dos combustíveis.....	58

## SIGLAS

- ACV – Avaliação de ciclo de vida
- APA – Associação Portuguesa do Ambiente
- APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis
- BEV – Veículo elétrico a bateria
- BRT – Bus Rapid Transit
- CNG – Gás natural comprimido
- EB – Autocarro elétrico
- EV – Veículo elétrico
- FC – Célula de combustível
- FCHEV – Veículo elétrico híbrido com células de combustível
- GEE – Gases com efeito de estufa
- GN – Gás natural
- GWP – Potencial de aquecimento global
- HEV – Veículo elétrico híbrido
- ICEB – Autocarro com motor de combustão interna
- ICEV – Veículo com motor de combustão interna
- NO<sub>x</sub> – Óxidos de azoto
- PHEV -Veículo elétrico Plug-in híbrido
- PM – Matéria particulada
- SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre
- USA – Estados Unidos da América
- VOCs – Compostos orgânicos voláteis

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da energia é atualmente o principal responsável pelas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em Portugal, representando 68% das emissões nacionais, das quais 24% são da responsabilidade dos transportes (APA, 2016). Além da reconhecida responsabilidade sobre as emissões de gases com efeito de estufa, os veículos de combustão interna são ainda responsáveis pela emissão de outros tipos de poluentes, como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), material particulado (PM) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). A crescente preocupação relativamente a estas emissões tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias, na tentativa de mitigar os impactos ambientais. No decorrer desse desenvolvimento tecnológico surgiram novas motorizações com recurso a combustíveis alternativos, como por exemplo o gás natural. Também os veículos movidos a eletricidade têm sofrido enormes evoluções tecnológicas. A par disto, as motorizações convencionais têm vindo a melhorar o seu desempenho ambiental, devido ao aumento da sua eficiência e também devido à implementação de sistemas que permitem reduzir algumas emissões, como por exemplo o filtro de partículas.

Devido ao desenvolvimento de tecnologias alternativas, é muito importante avaliá-las do ponto de vista energético e ambiental, com base numa perspetiva de ciclo de vida (CV). Neste contexto, a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) permite comparar meios de transporte e tecnologias, de modo a perceber qual o mais vantajoso do ponto de vista ambiental. Apesar do aumento de estudos e conhecimento nesta área, os resultados obtidos permanecem controversos, uma vez que cada estudo tem em conta diferentes considerações e perspetivas que influenciam direta ou indiretamente os resultados. Neste sentido, a tabela 1 apresenta resumidamente os estudos de ACV mais relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

Tabela 1 - Resumo do estado da arte mais relevante para esta dissertação

<b>Autores</b>	<b>Data</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Escala geográfica   temporal</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Unidade Funcional</b>	<b>Tecnologias</b>
Jamie Ally e Trevor Pryor	2007	Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems	Comparação dos impactes ambientais de 3 tipos de autocarros	Perth 2007	Well-to-wheels	veículo.km	EB; CNG; FC;
Mikhail V. Chester	2008	Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States	Avaliação de ciclo de vida de meios de transporte rodoviários, ferroviários e aéreos	USA	Cradle-to-grave	pessoa.km	Rodoviárias; Ferroviárias; Aéreas;
Notter <i>et al</i>	2010	Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles	Análise da contribuição das baterias de Lítio no impacte ambiental dos veículos	Europa	Cradle-to-grave	1 km percorrido	ICEV; EV;
Chester <i>et al</i>	2010	Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions	Avaliação dos impactes ambientais do transporte de passageiros	USA	Cradle-to-grave; Cradle-to-gate;	veículo.km pessoa.km	Carros; Autocarros; Comboios;
Rolf Frischknecht e Karin Flury	2011	Life cycle assessment of electric mobility: answers and challenges	Relatório do 43 fórum sobre ACV, incidindo nos aspetos sobre a mobilidade elétrica	Alemanha; Suíça; Portugal;	-	pessoa.km	BEV
Aguirre <i>et al</i>	2012	Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle	Avaliação dos impactes ambientais de diferentes tipos de veículos	Califórnia	Cradle-to-grave	1 milha percorrida	ICEV; EV; PHEV;

Tabela 1 - Resumo do estado da arte mais relevante para esta dissertação (continuação)

Hawkins <i>et al</i>	2012	Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	Comparação de veículos de combustão interna e veículos elétricos	Europa	Cradle-to-gate Cradle-to-grave	1 km percorrido	ICEV; EV;
Faria <i>et al</i>	2013	Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles	Comparação de diferentes tipos de veículos ligeiros, integrando diferentes sistemas eletroprodutores	Polónia; França; Portugal;	Cradle-to-grave	veículo.km	ICEV; PHEV; BEV;
Cooney <i>et al</i>	2013	Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses	Comparação dos impactes ambientais dos autocarros elétricos e a diesel ao longo do seu ciclo de vida	USA 2013-2025	Well-to-wheels	veículo.km	ICEB; EB;
Baptista <i>et al</i>	2013	Evaluation of the benefits of the introduction of electricity powered vehicles in an island	Avaliação dos benefícios da introdução de veículos elétricos na ilha das Flores, nos Açores	Flores, Açores  2009-2050	Cradle-to-grave	veículo.km	ICEV; PHEV; HEV; BEV;
Bauer <i>et al</i>	2015	The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework	Avaliação dos impactes ambientais de diferentes tipos de veículos	Europa 2012-2030	Cradle-to-grave;	veículo.km	ICEV; HEV; BEV; FCHEV;
Amir Abdul-Manan	2015	Uncertainty and differences in GHG emissions between electric and conventional gasoline vehicles with implications for transport policy making	Determinar a incerteza nas emissões de GEE entre veículos elétricos e de combustão interna, através de uma simulação de Monte Carlo	Mundo	Cradle-to-grave	veículo.km	ICEV; HEV; BEV;

A maioria dos estudos faz uma análise comparativa de tecnologias com o objetivo de avaliar ambientalmente os impactos dos veículos, apresentando resultados por veículo e não por pessoa transportada, e incidindo principalmente sobre os veículos ligeiros. Um menor número de estudos recai sobre veículos pesados, sendo que estudos que abrangem simultaneamente os dois tipos de veículos para a mesma função de resposta são ainda mais escassos. Existem também trabalhos exclusivamente sobre baterias, infraestruturas ou outros componentes automóveis, mas poucos fazem um estudo completo de ciclo de vida. Existe assim falta de estudos e informação, o que constitui uma motivação acrescida para a realização desta tese.

Dos estudos analisados, destaca-se o trabalho de Mikhail Chester sobre o transporte de passageiros em diferentes meios de transporte. Mikhail Chester (2008) foca-se no transporte de passageiros, comparando diferentes tipos de tecnologias e meios de transporte urbanos e suburbanos, analisando o consumo de energia e as emissões de gases com efeito de estufa. A elaboração de inventários específicos de ciclo de vida para cada tipo de meio de transporte foi um dos aspetos inovadores do estudo. Chester concluiu que o tipo de transporte rodoviário com menos impactos no transporte de uma pessoa.km é o veículo convencional, em detrimento do autocarro, monovolume e carrinha *pick-up*, para ambas as categorias. Apresenta também um cenário em que o autocarro viaja no pico de ocupação, passando assim a ser este o veículo com menos impacto para o transporte de uma pessoa num quilómetro. Numa análise deste género é muito importante ter em conta a taxa de ocupação dos veículos, visto que se está a comparar meios de transporte diferentes e com diferentes capacidades de ocupação.

Nesta dissertação, os veículos elétricos movidos a bateria são equipados com baterias do tipo  $\text{LiFePO}_4$ . Os estudos mostram que, de uma forma geral, o impacto da construção, manutenção e deposição/reciclagem da bateria num veículo elétrico é pouco significativo para as categorias de aquecimento global, depleção fóssil e energia primária, já que é a fase de operação que contribui mais para a carga ambiental causada pelos mesmos, dependendo diretamente do tipo de produção da eletricidade (Faria et al. 2013).

Nos estudos de veículos elétricos, o *mix* energético considerado é de extrema importância. Apesar deste tipo de veículos não emitir gases de combustão localmente e, desta forma, ter impactos locais reduzidos, podem existir impactos indiretos. A produção de eletricidade e o consumo do veículo em si vão influenciar significativamente a performance

ambiental dos veículos. Um veículo elétrico pode apresentar impactes mais ou menos significativos que um veículo de combustão interna (ICEV), dependendo do país em que opera. Por exemplo, se o *mix* de geração de eletricidade num país for fortemente baseado em fontes renováveis, os veículos elétricos vão apresentar melhor desempenho ambiental do que os ICEVs. Por outro lado, se for baseado em fontes fósseis como o carvão ou gás natural (ciclo simples), vão apresentar pior desempenho ambiental (Freire & Marques, 2012).

A maioria dos estudos foca-se na energia primária e nos gases com efeito de estufa, ignorando outras categorias ambientais. Dos trabalhos realizados nesta área depreende-se que a principal fonte de poluição dos ICEVs advém da fase de utilização dos veículos. Para os veículos elétricos depende do tipo de geração de eletricidade e da categoria de impacte ambiental considerada. Apesar do foco da maioria dos estudos estar na fase do uso, as restantes fases do ciclo de vida dos veículos também são importantes. Para algumas categorias de impacte, a produção e o fim de vida das baterias elétricas, por exemplo, é substancialmente relevante (Hawkins et al. 2013).

## 1.1. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é estudar sistemas alternativos para transporte urbano e suburbano, integrando a avaliação de diferentes tipos de tecnologias de transporte de pessoas que normalmente não são analisadas em conjunto, contribuindo ainda para o conhecimento nesta área e complementar estudos anteriormente realizados. É efetuada a comparação de diferentes tipos de motorização de veículos para a mobilidade urbana e suburbana, sendo analisado em particular o caso da cidade de Coimbra. Desta forma, o modelo e os resultados apresentam-se divididos para uma análise urbana, onde se avalia a mobilidade dentro da cidade de Coimbra, e suburbana na periferia de Coimbra. Adicionalmente, realiza-se uma análise onde se explora o percurso suburbano Serpins-Coimbra, incluindo a possibilidade de deslocação pela via atual ou a reativação da antiga linha de comboio.

Os meios de transporte urbanos podem dividir-se em veículos ligeiros e pesados. Já os meios de transporte suburbanos integram veículos ligeiros, pesados e ferroviários. Ambos

podem utilizar a motorização diesel, gasolina, GPL e elétrica, conforme detalhado na tabela 2. O veículo a gás natural é analisado apenas no meio urbano.

A avaliação de ciclo de vida foi realizada numa perspetiva global *cradle-to-grave*, com resultados calculados para sete categorias de impacto: aquecimento global, depleção fóssil, depleção metálica, acidificação terrestre, partículas (PM<sub>10</sub>), eutrofização de água doce e eutrofização marinha. Realiza-se ainda uma análise de sensibilidade às taxas de ocupação dos meios de transporte, com o objetivo de avaliar a sua influência nos resultados. A análise é feita para as categorias de aquecimento global e depleção fóssil. O facto de a análise cobrir todos estes impactos também torna o estudo mais completo, ganhando destaque comparativamente à globalidade dos estudos já realizados até à data.

Na tabela 2 estão identificados os diferentes tipos de veículos em análise nesta dissertação.

**Tabela 2 - Veículos e tecnologias analisadas**

<b>Meios de transporte urbano</b>	Veículos Ligeiros	Carro Diesel
		Carro Gasolina
		Carro GPL
		Carro Elétrico
	Veículos Pesados	Autocarro Diesel
		Autocarro Gás Natural
		Autocarro Elétrico
		Troleicarro (elétrico)
<b>Meios de transporte suburbano</b>	Veículos Ligeiros	Carro Diesel
		Carro Gasolina
		Carro GPL
		Carro Elétrico
	Veículos Pesados	Autocarro Diesel
		BRT* Diesel
		BRT* Elétrico
Veículos Ferroviários	Tram-Train (elétrico)	
	Automotora (diesel)	

\**Bus Rapid Transit*

Esta dissertação encontra-se organizada em quatro capítulos, sendo o primeiro a presente introdução. No capítulo 2 apresenta-se a metodologia adotada e os modelos e inventários de ciclo de vida das diferentes tecnologias estudadas. No capítulo 3 é realizada a caracterização das categorias de impacto e são apresentados os resultados, sendo efetuada a análise e interpretação dos mesmos. O capítulo 4 apresenta conclusões, limitações e propostas para trabalho futuro.

## **2. MODELO E INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA**

### **2.1. Metodologia: Avaliação de Ciclo de Vida**

Para a realização deste estudo foi utilizada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ISO 14040 e ISO 14044), a qual é uma ferramenta apropriada para avaliar os impactos de atividades de transportes, dado que permite caracterizar de uma forma holística os fluxos de materiais e energia. A ACV permite analisar os impactos ambientais de produtos ou serviços em todas as fases do seu ciclo de vida, desde a extração de recursos, através da produção de materiais, partes do produto e o produto em si, e o uso do produto para ser gerido depois de descartado, seja por meio da reutilização, reciclagem ou deposição final (Curran, 1996) e (Guinée, 2002). A ACV está estruturada em quatro etapas. Na primeira etapa da ACV define-se o objetivo e as fronteiras do sistema, as quais separam o objeto de estudo e o ambiente que o envolve. A segunda etapa é a elaboração do inventário de ciclo de vida. A terceira etapa é a avaliação dos impactos e a quarta etapa a interpretação dos mesmos, podendo incluir uma análise crítica e propostas de melhoria de redução de impactos.

### **2.2. Definição do objetivo e âmbito da ACV**

Na figura 1 estão representadas as fases do ciclo de vida analisadas, bem como os processos associados a cada fase. Foi efetuada uma análise *cradle-to-grave*, que implica uma avaliação completa de ciclo de vida, desde a extração das matérias primas para a construção dos componentes do veículo e das infraestruturas de circulação, da fase de utilização, até ao fim de vida dos mesmos.

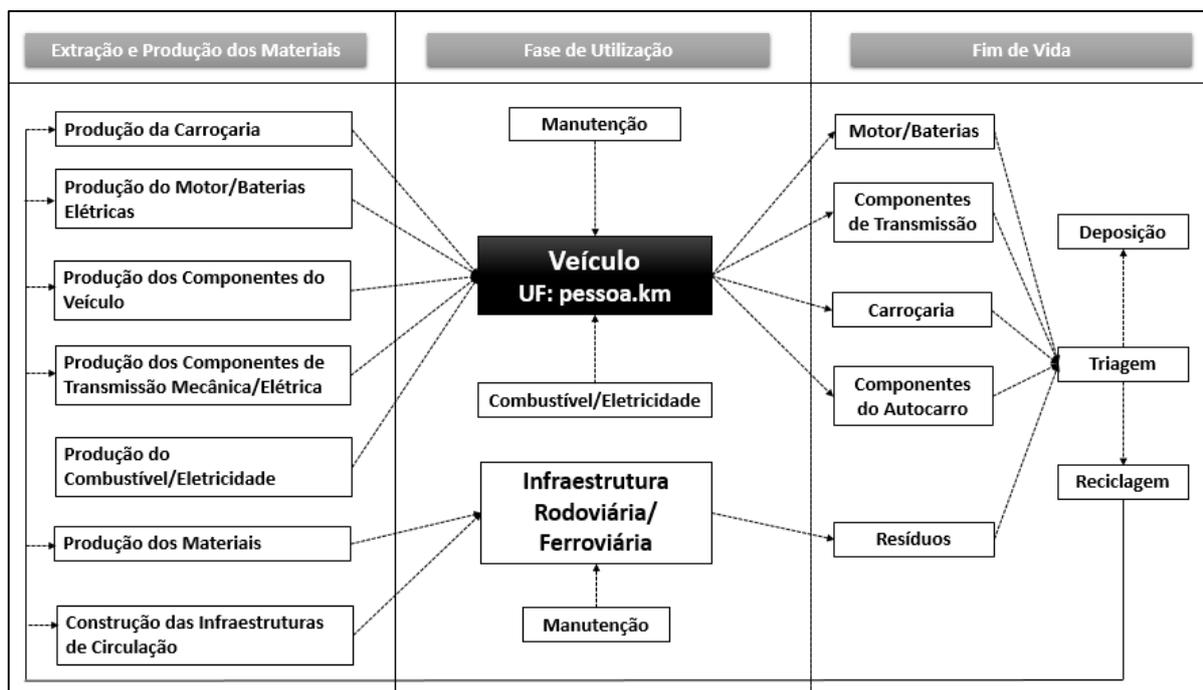


Figura 1 - Fronteiras do sistema de ciclo de vida

O ciclo de vida encontra-se dividido em três fases: produção, uso e fim de vida. A fase da produção implica a extração, o transporte, o processamento das matérias-primas e a energia necessária para a produção dos veículos e das infraestruturas. A fase de utilização implica o consumo de energia (combustíveis ou eletricidade) necessário para a deslocação dos veículos e também inclui a manutenção dos mesmos. Esta fase também contempla a utilização e manutenção da estrada, no caso de veículos de transporte rodoviário, e para veículos de transporte ferroviário tem em conta a construção e manutenção do caminho de ferro. O fim de vida dos veículos inclui diferentes destinos, mediante as características dos seus componentes. No final de vida os veículos são desmontados e separados por partes com características semelhantes. Os componentes que não têm potencial reciclável são incinerados ou seguem para deposição. Os que têm potencial de reciclagem dão origem a novos componentes automóveis. Os créditos da reciclagem são contabilizados nesta análise, bem como a energia e transporte necessários aos processos de fim de vida.

## 2.3. Caracterização dos Meios de Transporte

Nesta dissertação são comparados dois tipos de meios de transporte de pessoas para o meio urbano (ligeiros e pesado rodoviário) e 3 tipos para o meio suburbano (ligeiro e pesado rodoviário e ferroviário). Para cada tipo de meio de transporte são analisadas diferentes tecnologias de motorização de acordo com a tabela 2 (secção 1.1). Para a tecnologia elétrica apresentam-se duas opções distintas, o veículo alimentado 100% por bateria elétrica e o veículo que utiliza redes catenárias (trata-se de um sistema de alimentação e distribuição elétrica aérea).

As características dos vários meios de transporte variam de veículo para veículo, como pode ser observado nas tabelas 3 e 4. A diferenciação dos vários veículos e tecnologias foi realizada com recurso à base de dados *ecoinvent* para os dados secundários. As características das tecnologias da base de dados foram adaptadas para as características dos veículos em estudo, com base nos dados primários (tabelas 3 e 4). Os dados para as baterias dos veículos elétricos foram obtidos de Zackrisson et al (2010).

As infraestruturas rodoviárias e ferroviárias foram adotadas com base no *ecoinvent report no. 14* para as características e distâncias percorridas dos meios de transporte em estudo. A unidade funcional utilizada nesta dissertação é uma pessoa.km, pelo que todos os cálculos e resultados são expressos nessa unidade, exceto para a análise do percurso suburbano Serpins-Coimbra, onde a análise é realizada por pessoa.viagem. Na tabela 3 são apresentadas as tecnologias para o meio urbano e na tabela 4 para o meio suburbano, bem como as suas principais características, como o peso, ocupações e consumo.

### 2.3.1. Transporte urbano

O transporte urbano na cidade de Coimbra foi realizado com base em dados obtidos da literatura. Para os veículos pesados foram usados dados reais de utilização (SMTUC e STCP). Já os consumos para os veículos ligeiros foram obtidos através da DAT (*Deutsche Automobil Treuhand*). Para permitir uma análise robusta dos resultados foi incorporada incerteza nos consumos, ampliando a gama de consumos mediante as características dos veículos e tecnologias, tal como é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Características dos veículos urbanos

Tipo de veículo	Ligeiro*				Pesado					
	Tecnologia	Diesel	Gasolina	GPL	Elétrico	Diesel**	Troleicarro**	Elétrico***	Gás Natural****	
Peso total [ton]		1,3 <sup>1)</sup>	1,2 <sup>1)</sup>	1,1 <sup>1)</sup>	1,5 <sup>1)</sup>	18,9 <sup>2)</sup>	18,0 <sup>3)</sup>	19,2 <sup>4)</sup>	19,0 <sup>5)</sup>	
Lugares		5 <sup>1)</sup>				86 <sup>2)</sup>	81 <sup>3)</sup>	81 <sup>4)</sup>	90 <sup>5)</sup>	
Ocupação média [nº pessoas/veículo]		1,2 <sup>6)</sup>				9,6 <sup>7)</sup>				
Bateria (LiFePO4)		0,29 ton <sup>8)</sup> 24 kWh				1,45ton <sup>9)</sup> 174 kWh				
Consumo [/100km]		4,5 l	6,4 l	7,8 l	12,5 kWh	50,9 l	353,5 kWh	141,5 kWh	69,5 m <sup>3</sup> (n)	
		± 15%				± 10%				± 15%

<sup>1)</sup> DAT (2016);

<sup>2)</sup> Carris (2016);

<sup>3)</sup> Solaris Bus and Coach SA Catalog (2014);

<sup>4)</sup> BYD (2016);

<sup>5)</sup> MAN (2016);

<sup>6)</sup> APA (2014);

<sup>7)</sup> SMTUC (2014);

<sup>8)</sup> <http://www.auto-data.net/>;

<sup>9)</sup> FEDERAL TRANSIT BUS TEST, Report Number: LTI-BT-R1307.

\* Média representativa (veículos comercializados em 2016);

\*\*Dados médios de frota dos SMTUC (2013-2015);

\*\*\* Alternativa futura, baseada no veículo *BYD K9 (Federal Transit Administration)*;

\*\*\*\*Dados de frota dos STCP (2013-2015).

As características dos veículos ligeiros urbanos apresentados na tabela 3 têm por base veículos que estão a integrar o mercado atualmente na Europa, conforme publicado pela DAT (*Deutsche Automobil Treuhand*), em 2016. Os consumos de cada tecnologia são o resultado do cálculo das médias de consumos de vários modelos e marcas para a mesma classe de veículos (classe 1). Para a análise dos veículos, considera-se que percorrem uma distância de 200 000 km ao longo do ciclo de vida, percorrendo uma distância média de 20 000 km por ano, ao que corresponde uma duração média de 10 anos.

Para os veículos pesados urbanos são consideradas tecnologias atualmente implementadas em Coimbra e outras que poderão estar no futuro (nomeadamente o autocarro a gás natural e o autocarro elétrico). O autocarro diesel e o troleicarro são modelados a partir da frota de autocarros dos Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra (SMTUC) atualmente em atividade. Os seus consumos são o resultado da média dos consumos das frotas de autocarros urbanos em circulação durante os anos de 2013, 2014 e 2015 na cidade de Coimbra. O autocarro diesel é um veículo com um motor convencional de combustão interna a gasóleo e o troleicarro é um autocarro elétrico alimentado via catenária. Os veículos de referência para as duas tecnologias são o *Mercedes O.530 Citaro* e o *Skoda Solaris Trollino 12*, respetivamente.

O autocarro elétrico apresentado trata-se do veículo *BYD K9*, da empresa chinesa *BYD Auto Co. Ltd*, e é considerado um dos autocarros mais desenvolvidos tecnologicamente na atualidade. O veículo é equipado com um sistema de baterias do tipo  $\text{LiFePO}_4$  com uma autonomia de 207 km. As características apresentadas são o resultado do relatório da agência *Federal Transit Administration U.S. DOT*, desenvolvido a partir de testes efetuados ao autocarro. O objetivo de comparar esta tecnologia como alternativa às atualmente em circulação na cidade de Coimbra é perceber se pode ser viável do ponto de vista ambiental a circulação de um autocarro elétrico deste género na cidade.

O autocarro movido a gás natural é analisado com o mesmo objetivo do autocarro elétrico. As bases das características para o estudo deste veículo são adaptadas dos resultados dos autocarros a gás natural da Sociedade de Transportes Coletivos do Porto (STCP) durante os anos de 2013, 2014 e 2015. O autocarro analisado é equivalente a um *MAN Lion's City* a gás natural.

Assume-se que todos os veículos pesados urbanos percorrem uma distância média de ciclo de vida de 725 200 km, exceto o troleicarro que percorre uma distância média de 1 410 000 km (Spielmann *et al.* 2007). Esta diferença deve-se ao facto de os componentes do troleicarro terem uma maior durabilidade. Segundo o Relatório e Contas 2015 dos SMTUC, os autocarros em Coimbra percorrem uma distância média diária de 167 km por dia, o que implica que os autocarros com um horizonte de 725 200 km tenham uma longevidade de 12 anos e o troleicarro de 23 anos.

A ocupação média dos veículos ligeiros a circular no meio urbano é de 1,2 pessoas por veículo (APA, 2013). A ocupação média dos veículos pesados urbanos a circular em Coimbra durante o ano de 2015 foi de 9,6 pessoas por veículo (SMTUC, 2015), valor esse que foi utilizado para efeitos de cálculo. A taxa de ocupação é alvo de uma análise de sensibilidade.

### **2.3.2. Transporte suburbano**

O transporte suburbano considera a periferia de Coimbra e em particular o trajeto Serpins-Coimbra. Os dados de consumo para os veículos ligeiros e pesados foram obtidos de igual forma aos veículos urbanos. Do mesmo modo, foi incorporada incerteza nos consumos.

Tabela 4 – Características dos veículos suburbanos

Tipo de veículo	Ligeiro*				Pesado			Ferroviário	
	Diesel	Gasolina	GPL	Elétrico	Diesel**	BRT Diesel***	BRT Elétrico****	<i>Tram-train</i> ***** (metro de superfície)	Automotora <i>Allan</i> *****
<b>Tecnologia</b>									
<b>Peso total [ton]</b>	1,3 <sup>1)</sup>	1,2 <sup>1)</sup>	1,1 <sup>1)</sup>	1,5 <sup>1)</sup>	18 <sup>2)</sup>	18,9 <sup>3)</sup>	19,2 <sup>4)</sup>	62,5 <sup>5)</sup>	105,6 <sup>6)</sup>
<b>Lugares</b>			5 <sup>1)</sup>		52 <sup>2)</sup>	86 <sup>3)</sup>	81 <sup>4)</sup>	248 <sup>5)</sup>	358 <sup>6)</sup>
<b>Ocupação média [nº pessoas/ veículo]</b>			1,4			16		80	
<b>Bateria (LiFePO4)</b>				0,29 ton <sup>7)</sup> 24 kWh			1,45 ton <sup>8)</sup> 174 kWh		
<b>Consumo [/100km]</b>	3,8 l	5 l	6,2 l	14 kWh	43 l	36,7 l	123,9 kWh	551,9 kWh	220 l
			± 15%		± 10%		± 5%		± 5%

<sup>1)</sup> DAT (2016);

<sup>2)</sup> <https://www.setra-bus.com/>

<sup>3)</sup> Carris (2016);

<sup>4)</sup> BYD (2016);

<sup>5)</sup> <http://www.bombardier.com/>

<sup>6)</sup> CP (2002);

<sup>7)</sup> <http://www.auto-data.net/>

<sup>8)</sup> FEDERAL TRANSIT BUS TEST, Report Number: LTI-BT-R1307.

\* Média representativa (veículos comercializados em 2016);

\*\* Transporte que realiza a viagem Serpins-Coimbra atualmente;

\*\*\* Alternativa futura, operando como *Bus Rapid Transit* (BRT), considerando uma tecnologia atual;

\*\*\*\* Alternativa futura, operando como BRT, baseada no veículo *BYD K9*;

\*\*\*\*\* Alternativa futura, baseada na tecnologia do metro do Porto;

\*\*\*\*\* Alternativa antiga, automotora *Allan*, em circulação entre 2000 e 2010.

Os veículos ligeiros suburbanos apresentados na tabela 4 são os veículos que estão a integrar o mercado atualmente, conforme publicado pela DAT (*Deutsche Automobil Treuhand*), em 2016. A diferença na caracterização dos veículos ligeiros suburbanos e urbanos está apenas nos consumos, pois são o mesmo tipo de veículos. Os consumos de cada tecnologia são o resultado do cálculo das médias de consumos de vários modelos e marcas da mesma gama, para o percurso suburbano. As comparações feitas têm como base uma distância percorrida de ciclo de vida de 200 000 km (20 000 km por ano ao longo de 10 anos).

Para o autocarro diesel em estudo, o horizonte temporal do veículo é de 1 000 000 km (10 anos), assumindo que realiza seis viagens diárias de cerca de 46 km. As especificidades apresentadas na tabela são relativas ao padrão dos autocarros que fazem o serviço atualmente e à média dos consumos dos mesmos. Para efeito de caracterização assumiu-se o autocarro *Setra S 315 GT*.

O *Bus Rapid Transit* (BRT) é um sistema de transporte público que visa aliar a rapidez e capacidade do *Light Rail* com o baixo custo e simplicidade do sistema de autocarros, ocorrendo a circulação do mesmo numa faixa de rodagem exclusiva de forma a evitar o congestionamento do trânsito. Neste projeto assumiu-se que o BRT circula numa via própria alcatroada. Como opções de estudo analisaram-se dois tipos de motorização para o BRT: o sistema de tração convencional diesel e o sistema elétrico a bateria.

O BRT diesel e o BRT elétrico são caracterizados neste estudo pelos autocarros *Mercedes O.530 Citaro* e *BYD K9*, respetivamente, sendo que as dimensões dos mesmos são adequadas às dimensões da linha ferroviária. O horizonte temporal do veículo é de 1 000 000 km e 7 anos, assumindo que o BRT realiza onze viagens diárias de cerca de 35 km.

A análise dos meios de transporte ferroviário é idêntica à realizada para os BRT, apesar de circularem numa linha ferroviária. Neste sentido é comparada uma automotora *Allan*, tecnologia antiga, com um *tram-train* (metro) igual ao que circula atualmente na cidade do Porto, o *MP 101-130 Flexity Swift*. As características físicas e os consumos da automotora são os da automotora que se encontrava em funcionamento no ramal Coimbra-Serpins. O veículo realizava onze viagens diárias de 35 km, correspondente à distância da linha ferroviária entre os dois destinos, ao longo de 30 anos, o que se traduz em 5 750 000 km percorridos na totalidade da vida útil do veículo.

As características utilizadas no estudo do metro são adaptadas das características do metro que circula atualmente no Porto, com base nos relatórios da STCP de 2012, 2013 e 2014, resultando nos valores apresentados na tabela 3. Assume-se igualmente que o veículo realiza 11 viagens diárias de cerca de 35 km, ao longo de 35 anos, o que se traduz em 6 700 000 km percorridos na totalidade do ciclo de vida.

A taxa de ocupação média utilizada para os veículos ligeiros que circulam no meio suburbano é de 1,4 pessoas por veículo. Nesta dissertação assume-se que os veículos pesados suburbanos rodoviários que circulam na periferia de Coimbra têm uma ocupação média de 16 pessoas por veículo, valor esse que foi utilizado para efeitos de cálculo no presente projeto. Para os veículos suburbanos ferroviários assume-se que estes têm uma ocupação média de 80 pessoas por veículo. A taxa de ocupação é um fator muito relevante neste trabalho, uma vez que a unidade funcional é expressa em pessoa.km. Desta forma, a taxa de ocupação vai ser alvo de uma análise de sensibilidade.

Para o caso de estudo do transporte de pessoas no trajeto Serpins-Coimbra foram analisados dois percursos alternativos: um percurso via rodoviária com uma distância de 46 km e outro por linha ferroviária (atualmente desativada) com uma distância de 35 km. As tecnologias comparadas e as suas características estão apresentadas na tabela 4. Os veículos avaliados neste caso de estudo são os mesmos da análise suburbana, na periferia de Coimbra. Da mesma forma, as características, consumos e distâncias percorridas do ciclo de vida são iguais às dos veículos suburbanos. Apenas diferem no facto de este caso específico avaliar os meios de transporte para dois percursos alternativos (estrada nacional e linha ferroviária Serpins-Coimbra). Estes percursos diferem na distância, e por isso a análise é feita por pessoa.viagem, para avaliar os impactes das diferentes alternativas.

### **2.3.3. Utilização e manutenção da estrada e ferrovia**

O presente trabalho teve especial atenção ao cálculo da infraestrutura de circulação no ciclo de vida dos veículos, incluindo a construção, manutenção e fim de vida. A alocação dos impactes de ciclo de vida da infraestrutura de circulação aos meios de transporte urbano teve por base o número de quilómetros percorridos durante o ciclo de vida e o peso dos veículos (Spielmann *et al*, 2007). A infraestrutura estrada utilizada pelos meios de transporte suburbano que circulam na rodovia existente teve uma modelação idêntica à dos veículos urbanos. Para os veículos BRT suburbanos, foi-lhes atribuída a totalidade dos impactes da construção e manutenção da estrada ao ciclo de vida deste veículo. A avaliação teve que ser feita desta forma, uma vez que eles são os únicos veículos a circular numa via construída e mantida especialmente para a sua deslocação. Para o caso da ferrovia, considerou-se a instalação desta, dedicada ao metro e automotora. A atribuição dos impactes também foi totalmente atribuída à utilização do veículo (situação idêntica ao BRT). Para o caso de estudo particular Serpins-Coimbra, foi adaptada a mesma metodologia utilizada para as infraestruturas de circulação dos meios de transporte suburbanos.

### **2.4. Mix de geração de eletricidade**

A fase de uso é de extrema importância no ciclo de vida dos veículos, destacando-se para os meios de transporte elétricos a produção da eletricidade. O *mix* elétrico resulta do conjunto das contribuições das diferentes fontes de energia que constituem o sistema electroprodutor. A produção de eletricidade pode apresentar diferentes perfis ambientais, dependendo do tipo de geração que apresenta. Uma produção elétrica com base em carvão, petróleo e gás natural implica maiores impactes ambientais do que uma geração a partir de energias renováveis (ex. eólica, hídrica, solar).

Nesta tese considerou-se a média do *mix* elétrico português de 2010 a 2014 como base de cálculo para a energia que alimenta os veículos elétricos em estudo. A tabela 5 apresenta o *mix* energético referente à produção de energia elétrica para Portugal nos anos de 2010 a 2014 (Garcia *et al*. 2014).

Tabela 5 – *Mix elétrico (média portuguesa de 2010 a 2014)*

<b>Fontes de produção de energia</b>	<b>2010 (%)</b>	<b>2011 (%)</b>	<b>2012 (%)</b>	<b>2013 (%)</b>	<b>2014 (%)</b>	<b>Média (%)</b>
Carvão	13	18	25	22	23	20,1
Gás Natural	28	28	21	14	13	20,6
Hídrica	30	22	10	27	31	24
Solar	0	1	1	1	1	0,8
Eólica	17	18	20	24	24	20,7
Biomassa/ Outras	7	8	7	6	6	6,8
Saldo Importador	5	6	16	6	2	7

O ano de 2014 foi um ano excecionalmente positivo para Portugal, sendo que 62% da eletricidade foi produzida a partir de fontes renováveis (APREN, 2015). Apesar disso, a média dos anos de 2010 a 2014 apresenta valores favoráveis, uma vez que mais de metade da eletricidade foi produzida a partir de fontes renováveis. A energia hídrica foi a que contribuiu com maior percentagem para este feito, seguida da eólica. No entanto, como terceiro e quarto maiores contribuidores estão o gás natural e o carvão, respetivamente, fontes com grande impacte ambiental (REN, 2015).

### 3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise comparativa dos diferentes meios de transporte estudados, divididos entre o meio urbano e suburbano, os quais foram calculados com base no método ReCiPe.

#### 3.1. Descrição do Método de Impacte Ambiental

Foi aplicado o método ReCiPe Midpoint implementado no software Simapro 8. Apesar do método permitir analisar 18 categorias, foram analisadas apenas sete, devido ao grande grau de incerteza que algumas apresentam (JRC European commission, 2011). As categorias de impacte analisadas encontram-se representadas na tabela 6.

Tabela 6 - Categorias de impacte ambiental analisadas (método ReCiPe)

<b>Categoria Ambiental</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidades</b>
Aquecimento Global	Efeito de estufa na atmosfera.	kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção Fóssil	Depleção de combustíveis fósseis, tendo em conta as reservas e taxas de extração.	kg petróleo eq
Depleção Metálica	Depleção de metais, tendo em conta as reservas e taxas de extração.	kg Fe eq
Acidificação terrestre	Impactes associados à deposição de substâncias acidificantes.	kg SO <sub>2</sub> eq
PM <sub>10</sub>	Libertação de matéria particulada com dimensão menor que 10 micrómetros.	kg PM <sub>10</sub> eq
Eutrofização Água Doce	Impactes devido a níveis excessivos de macronutrientes no ambiente aquático.	kg P eq
Eutrofização Marinha	Impactes devido a níveis excessivos de macronutrientes no ambiente aquático.	kg N eq

## 3.2. Análise Ambiental

A presente secção apresenta os resultados dos meios de transporte e tecnologias analisados e divide-se em 2 partes: análise urbana e suburbana. Na análise suburbana também é explorado o percurso Serpins-Coimbra. Adicionalmente é efetuada uma análise de sensibilidade à taxa de ocupação dos veículos, quer para meio urbano, quer para meio suburbano. Os resultados são apresentados por categorias de impacte ambiental, segundo a ordem exposta na tabela 6.

### 3.2.1. Análise urbana

As figuras seguintes (Figura 2 - Figura 8) mostram os resultados para as diferentes categorias de impacte ambiental, evidenciando os processos que mais contribuem para o impacte dos meios de transporte urbano. Os resultados têm por base as características e taxas de ocupação apresentadas na tabela 3, secção 2.3.1.

A figura 2 apresenta os resultados dos veículos urbanos para a categoria de aquecimento global, expresso em gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km. As barras de erro mostram a incerteza associada aos consumos, tal como identificado na tabela 3.

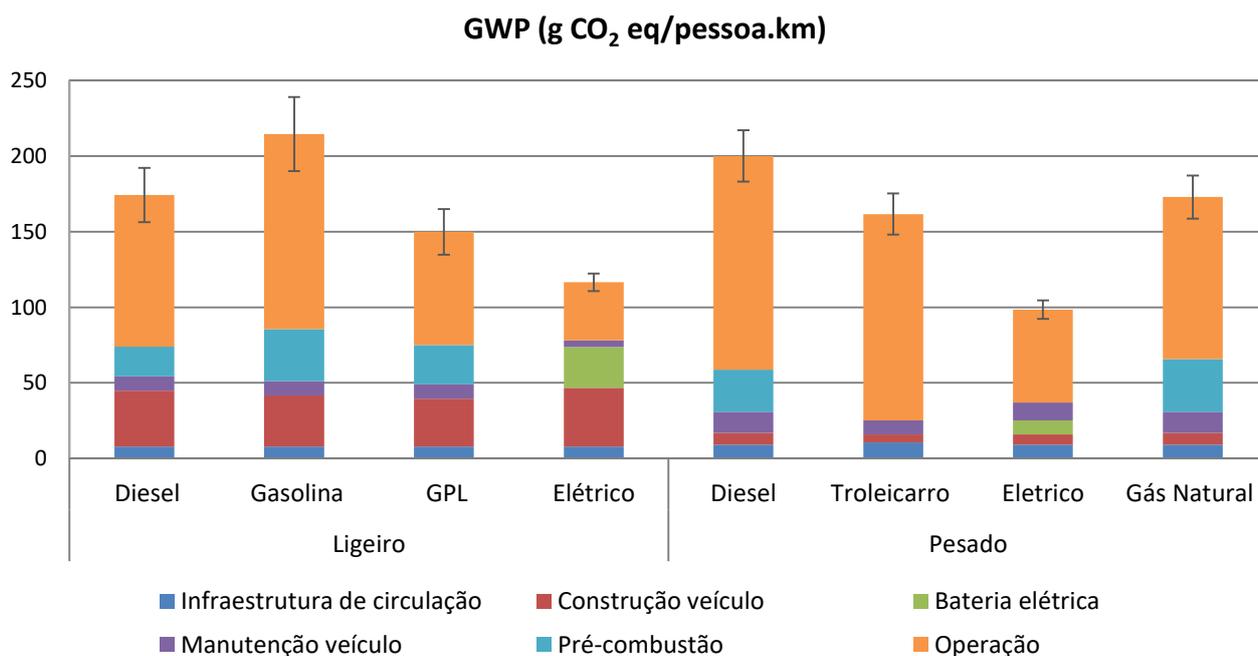


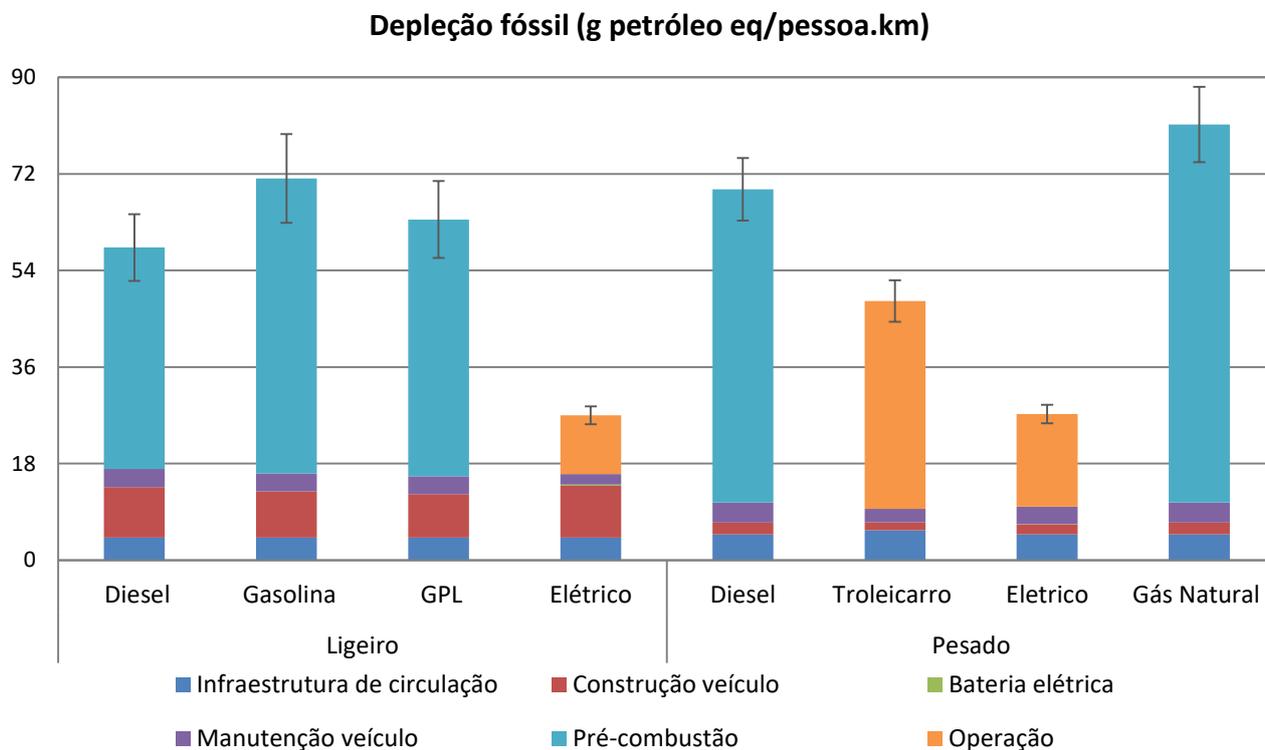
Figura 2 - Potencial de aquecimento global dos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)

Os resultados mostram que o veículo ligeiro a gasolina é o que apresenta maior impacto para o transporte de uma pessoa.km (239 gramas CO<sub>2</sub> eq), devido maioritariamente à contribuição das emissões de gases com efeito de estufa da pré-combustão e combustão da gasolina. O meio de transporte que menos contribui para o aquecimento global no transporte de uma pessoa.km é o autocarro elétrico (92 gramas CO<sub>2</sub> eq).

Os meios de transporte elétricos apresentam os menores impactos para o aquecimento global comparativamente aos restantes veículos, o que pode ser explicado pelo *mix* elétrico gerado maioritariamente por fontes de energia renováveis, que contribuem menos para o aquecimento global. A incerteza incorporada nos consumos apresenta-se como um parâmetro que não é crítico na identificação da tecnologia com melhor desempenho ambiental (veículo pesado elétrico).

Verifica-se que a fase de utilização é aquela que tem maior influência no potencial de aquecimento global na maioria dos veículos, exceto para o veículo ligeiro elétrico, o que se deve às emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da queima dos combustíveis ou da produção de eletricidade. Por outro lado, as infraestruturas de circulação têm pouco impacto na categoria de aquecimento global. A produção e a manutenção dos veículos também apresentam pouca contribuição para o aquecimento global, exceto no caso do veículo ligeiro elétrico, devido às emissões associadas à produção e manutenção dos componentes elétricos e da bateria.

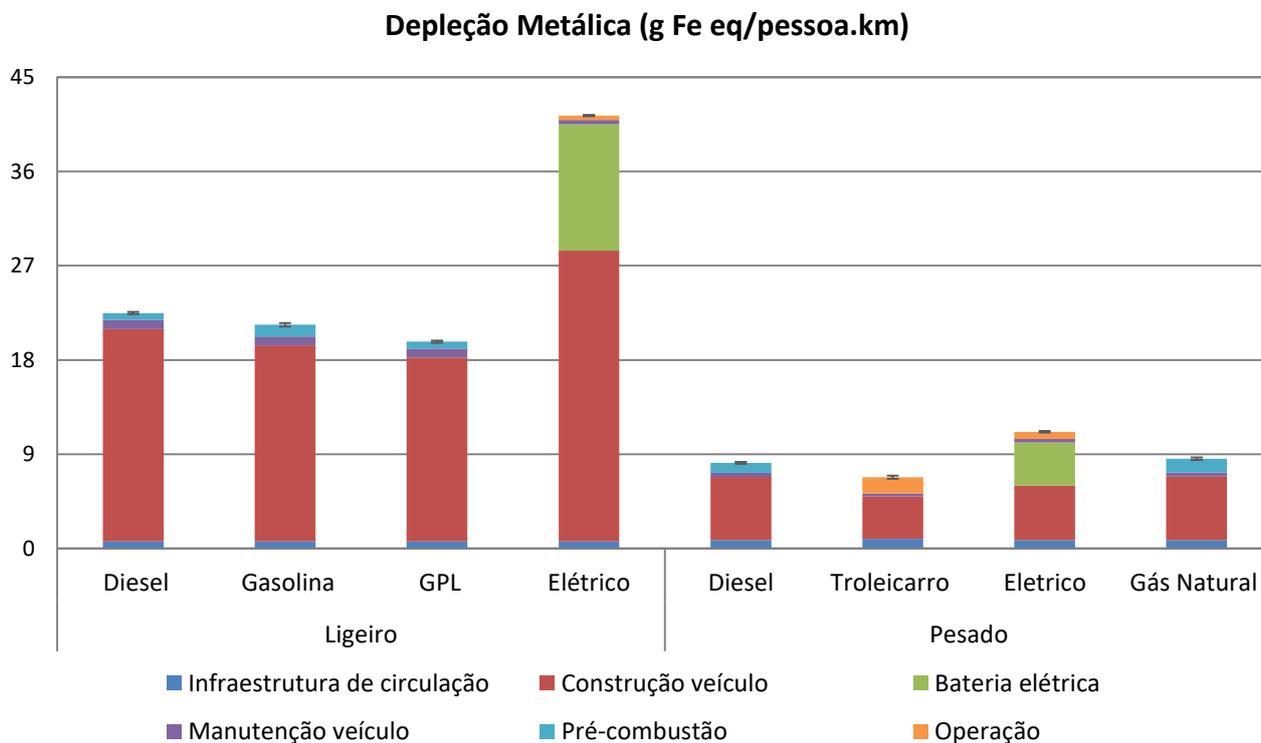
A Figura 3 mostra os resultados para a depleção fóssil causada pelos meios de transporte urbanos, expressos em gramas de petróleo equivalente por pessoa.km. O transporte de uma pessoa apresenta maior depleção fóssil quando realizado pelo autocarro a gás natural, resultado do grande consumo de combustível. De notar que o consumo para o autocarro a GN é adaptado da frota da STCP, cujos valores de consumo são superiores aos da frota de autocarros dos SMTUC. Com a incerteza incrementada nos consumos não é possível afirmar que é sempre o meio de transporte que apresenta maior impacto.



**Figura 3 - Depleção fóssil causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

A pré-combustão é a que mais contribui para o consumo de combustíveis fósseis devido à prospeção de petróleo e gás natural para processamento dos combustíveis que alimentam os veículos com motorização convencional. A geração de eletricidade é também realizada a partir de combustíveis fósseis, mas no *mix* elétrico utilizado (média dos anos de 2010 a 2014) estes representaram apenas 41%, o que se traduz num impacte ambiental dos veículos elétricos inferior ao dos veículos de combustão interna. Verifica-se ainda que o perfil ambiental dos veículos é idêntico para as categorias de aquecimento global e depleção fóssil.

Os resultados para a categoria de depleção metálica são apresentados na figura 4, expressos em gramas de ferro eq por pessoa.km. O troleicarro é o veículo que apresenta menor depleção metálica para o transporte de uma pessoa.km, o que se deve ao facto de ser alimentado a eletricidade via catenária, não necessitando de um sistema de bateria elétrica. A incerteza associada aos consumos não é determinante na procura da tecnologia com menores impactes.

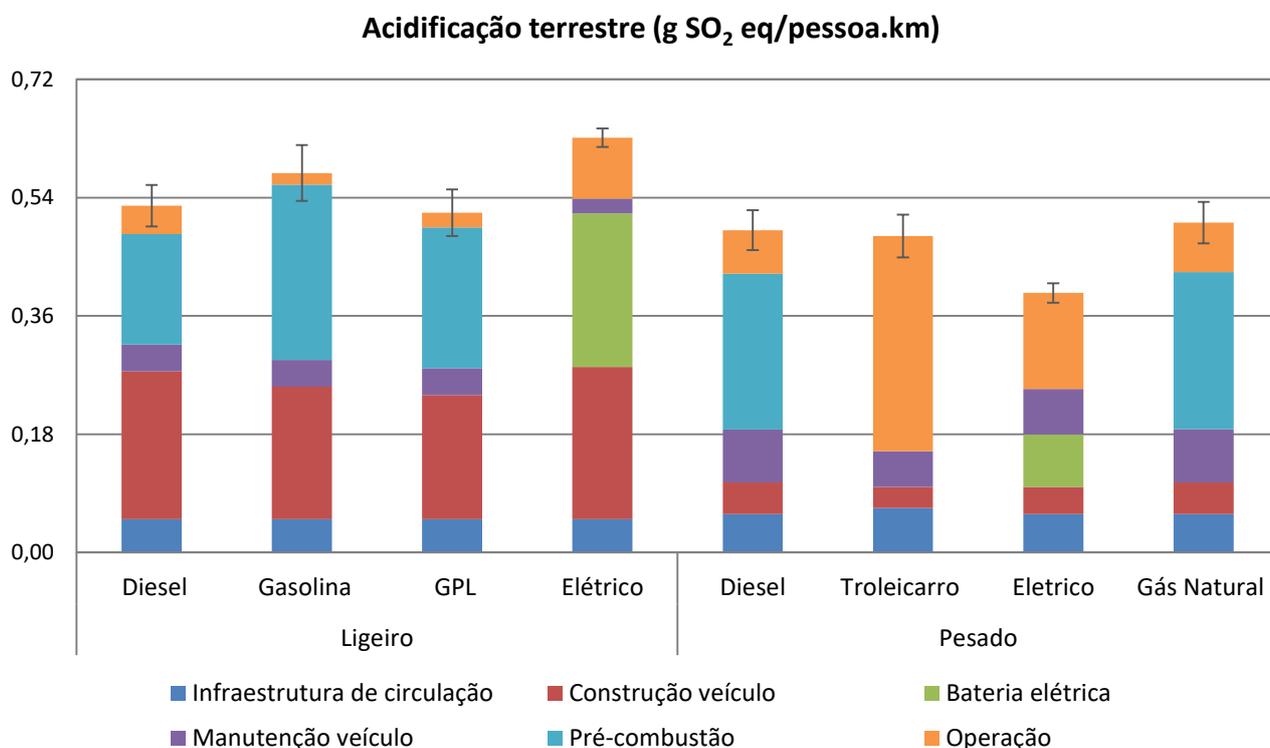


**Figura 4 – Depleção metálica causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

A construção dos veículos é a principal causa para a depleção metálica, devido à necessidade de materiais desta categoria para a construção dos componentes e da estrutura dos veículos. Neste contexto, os veículos elétricos apresentam maiores impactos do que os ICEVs, isto porque os EVs apresentam um sistema complexo de transmissão elétrica, o que implica o recurso acrescido a cobre e alumínio, componentes com grande impacto ambiental. Também a construção das baterias implica uma grande necessidade de recorrer a matérias-primas que provocam depleção metálica. Estas duas questões aliadas fazem com que os veículos elétricos sejam os que apresentam maior impacto nesta categoria. Desta forma o veículo ligeiro elétrico é o que apresenta um impacto maior no transporte de uma pessoa.km, o que pode ser explicado pelos consumos e taxas de ocupação distintas dos veículos ligeiros e pesados. A construção das estradas, pré-combustão e manutenção dos veículos têm muito pouca contribuição para a depleção metálica.

A Figura 5 apresenta os resultados relativamente à acidificação terrestre, expressos em gramas de SO<sub>2</sub> eq por pessoa.km. O veículo ligeiro elétrico é o que apresenta maiores impactos para a acidificação terrestre, devido principalmente à contribuição da bateria

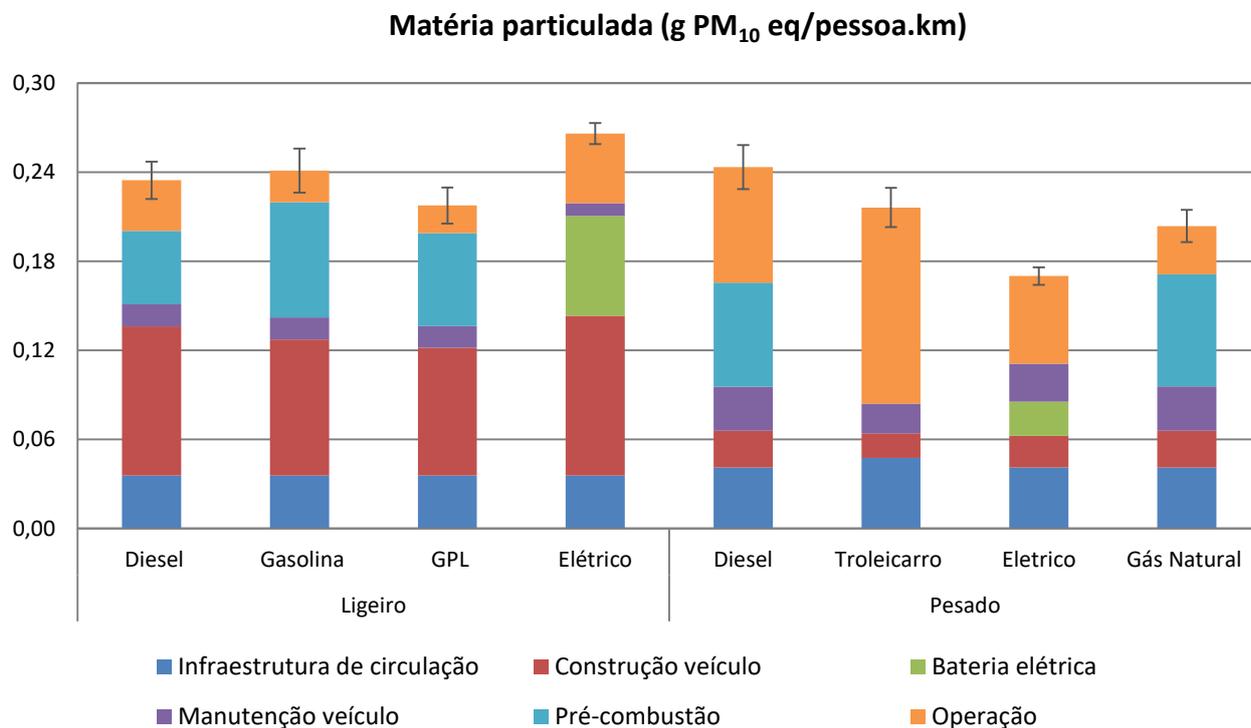
elétrica. Já o autocarro elétrico é o que tem impactes menos significativos, mesmo com a incerteza associada aos consumos. Esta diferença é justificada pelos diferentes consumos e ocupações dos veículos ligeiros e pesados.



**Figura 5 - Acidificação terrestre causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

Nos veículos elétricos, a operação apresenta uma grande contribuição para o impacto ambiental, sendo o sistema electroprodutor o que mais contribui para os impactes, o que depende diretamente da contribuição de eletricidade produzida a partir de carvão e gás natural, principalmente. A pré-combustão é a principal fonte de acidificação terrestre nos ICEVs, causa direta do processamento dos combustíveis. Por outro lado, a combustão em si contribui pouco para a acidificação terrestre.

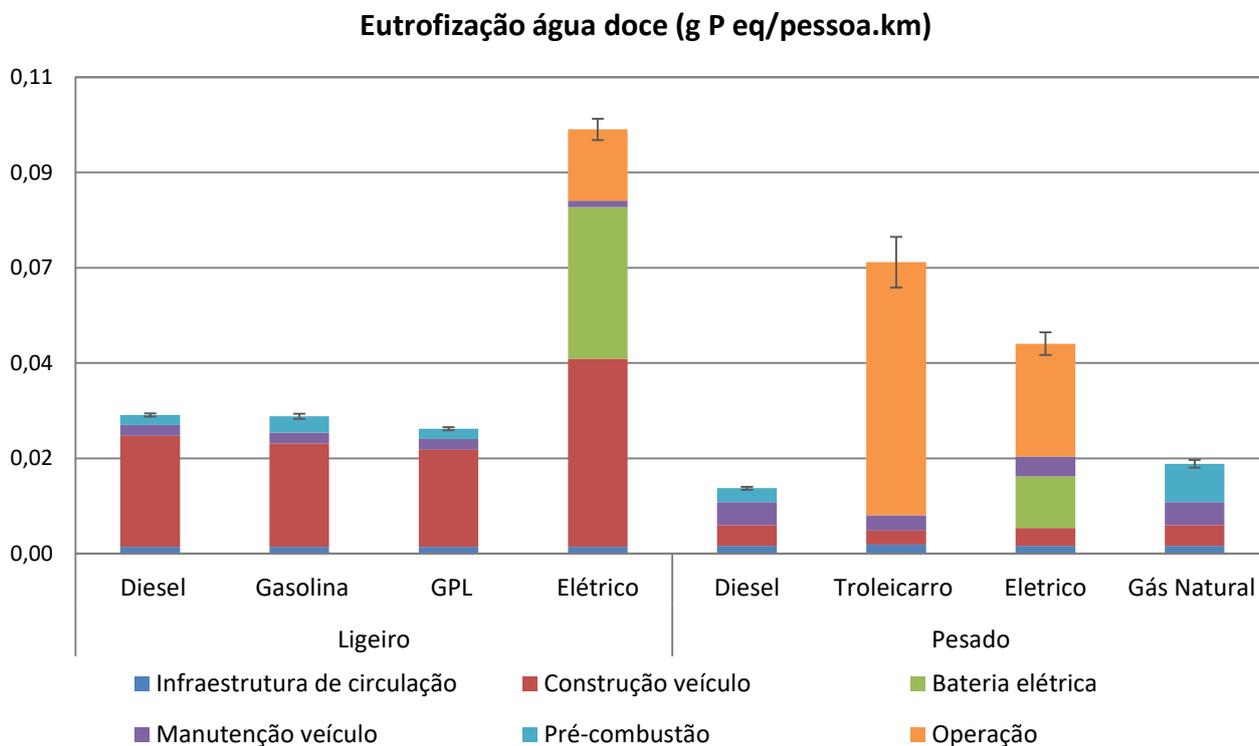
A figura 6 apresenta os resultados relativamente à matéria particulada, expressos em PM<sub>10</sub> eq por pessoa.km. O veículo ligeiro elétrico é o que apresenta impactes mais elevados nesta categoria. Por outro lado, é o autocarro elétrico que apresenta menores impactes.



**Figura 6 – Matéria particulada libertada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

De uma forma geral, estas emissões estão associadas à geração e consumo dos combustíveis nos ICEVs e na fase de operação dos veículos elétricos, consequência do consumo de eletricidade. Também a construção e manutenção do veículo apresenta uma influência significativa nesta categoria. No entanto, é importante referir que as emissões não têm em conta o local onde ocorrem. A bateria também tem uma influência importante nesta categoria de impacto ambiental, resultado da construção e deposição/reciclagem da mesma.

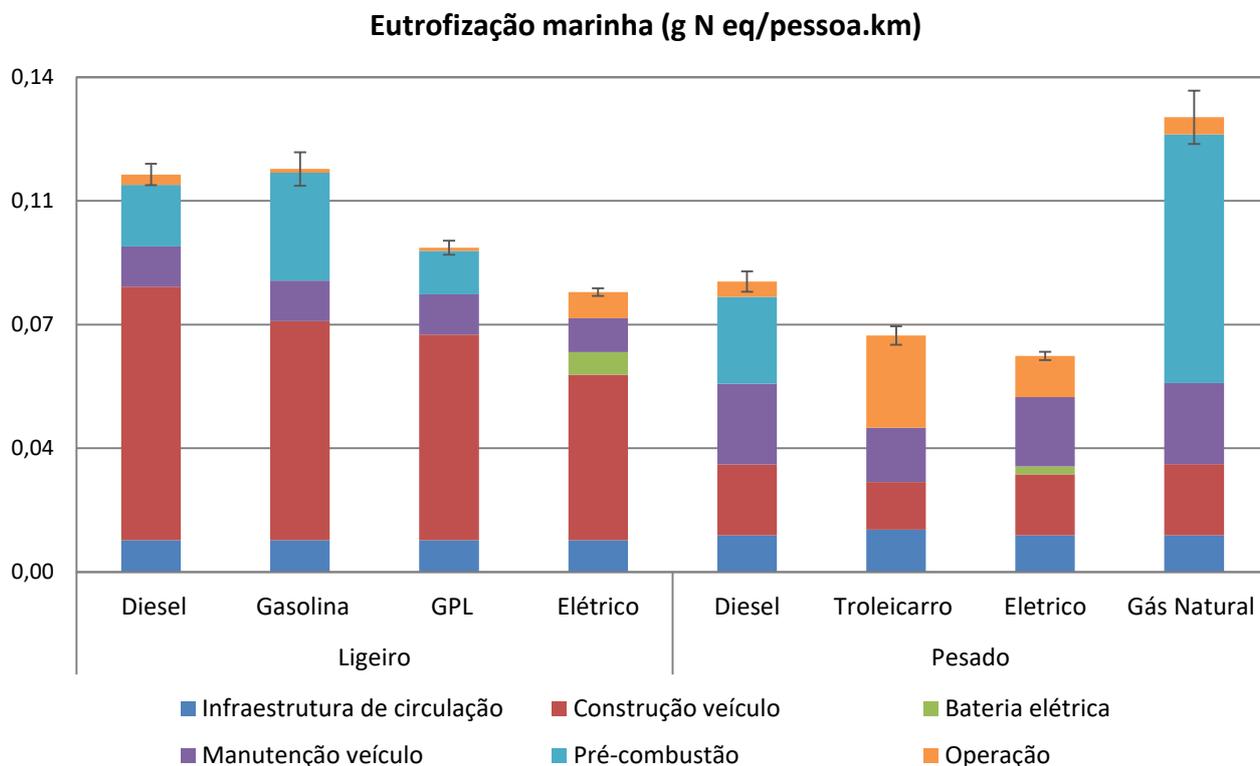
A Figura 7 apresenta os resultados relativamente à eutrofização de água doce, expressa em gramas de fósforo eq por pessoa.km. O veículo ligeiro elétrico é o meio de transporte que apresenta maior impacto. Os veículos elétricos de passageiros destacam-se negativamente nesta categoria devido à grande contribuição da produção da bateria e ao consumo de eletricidade na fase do uso. Tal deve-se ao facto de as baterias serem do tipo LiFePO<sub>4</sub>, o que implica utilização de fosfato.



**Figura 7 - Eutrofização de água doce causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

O sistema electroprodutor contribui significativamente para o impacte ambiental nesta categoria devido à geração de eletricidade com base em carvão e gás natural. Estas fontes contribuem muito para a eutrofização de água doce. A incerteza incorporada nos consumos apresenta-se como um parâmetro que não é crítico na identificação da tecnologia com melhor ou pior desempenho ambiental.

Os resultados relativamente à eutrofização marinha expressos em g de azoto eq por pessoa.km são apresentados na figura 8. O autocarro a gás natural é o veículo com valores mais elevados de eutrofização marinha, devido ao grande impacte da pré-combustão de GN.



**Figura 8 - Eutrofização marinha causada pelos veículos urbanos (ocupação: ligeiros 1,2; pesados 9,6)**

A construção e manutenção dos veículos são os principais contribuintes para a eutrofização marinha nos meios de transporte ligeiros. A pré-combustão e geração elétrica são processos que influenciam fortemente os resultados dos veículos pesados para esta categoria de impacte ambiental. Ainda assim, a incerteza associada aos consumos não influência a análise aos meios de transporte com maior e menor impacte.

Os resultados mostram que para as categorias de aquecimento global, depleção fóssil e eutrofização marinha, os veículos elétricos (ligeiros e pesados) apresentam impactes inferiores aos dos restantes meios de transporte. Nas categorias de depleção metálica e eutrofização de água doce são os veículos de combustão interna (ligeiros e pesados) que apresentam melhores resultados.

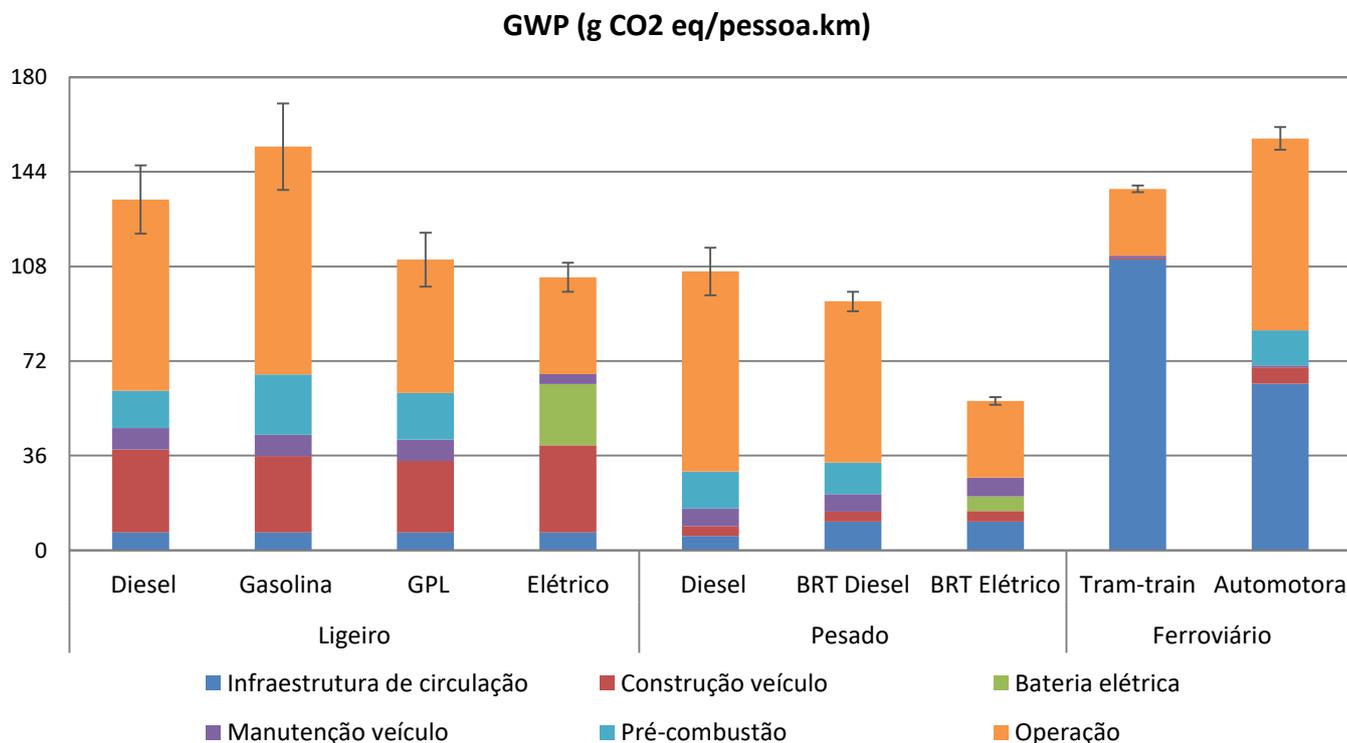
A incerteza associada aos consumos é importante porque permite verificar que o consumo de um veículo não é sempre igual. Também existem situações onde a incerteza associada não é determinante na procura da tecnologia com menores ou maiores impactes, como acontece na categoria de depleção metálica.

### 3.2.2. Análise suburbana

Esta análise incide sobre meios de transporte rodoviário e ferroviário em conjunto. As figuras seguintes mostram os resultados para as diferentes categorias de impacto ambiental, evidenciando os processos que mais contribuem para o impacto dos meios de transporte suburbano. Os resultados têm por base as características e taxas de ocupação apresentadas na tabela 4 (secção 2.3.2).

A análise dos resultados tem que ser cuidada uma vez que os consumos e taxas de ocupação são diferentes para os veículos ligeiros e pesados, o que influencia as diferentes fases do ciclo de vida. O facto de os veículos ligeiros percorrerem uma distância média durante o ciclo de vida significativamente inferior aos pesados também influencia os resultados expressos em pessoa.km. Além da análise por pessoa.km, é ainda realizada a análise dos impactos ambientais de uma viagem no percurso Serpins-Coimbra, para os diferentes meios de transporte suburbanos.

A figura 9 apresenta os resultados dos veículos suburbanos para a categoria de aquecimento global, expresso em gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km. O gráfico mostra que o meio de transporte com o maior impacto para esta categoria de impacto ambiental é o ligeiro a gasolina, devido principalmente às emissões de gases com efeito de estufa da combustão da gasolina. A incerteza incrementada nos consumos mostra que este veículo pode não apresentar sempre o maior impacto ambiental. O veículo que contribui menos para o aquecimento global é o BRT elétrico, devido à taxa de ocupação do mesmo e do *mix* de carregamento.

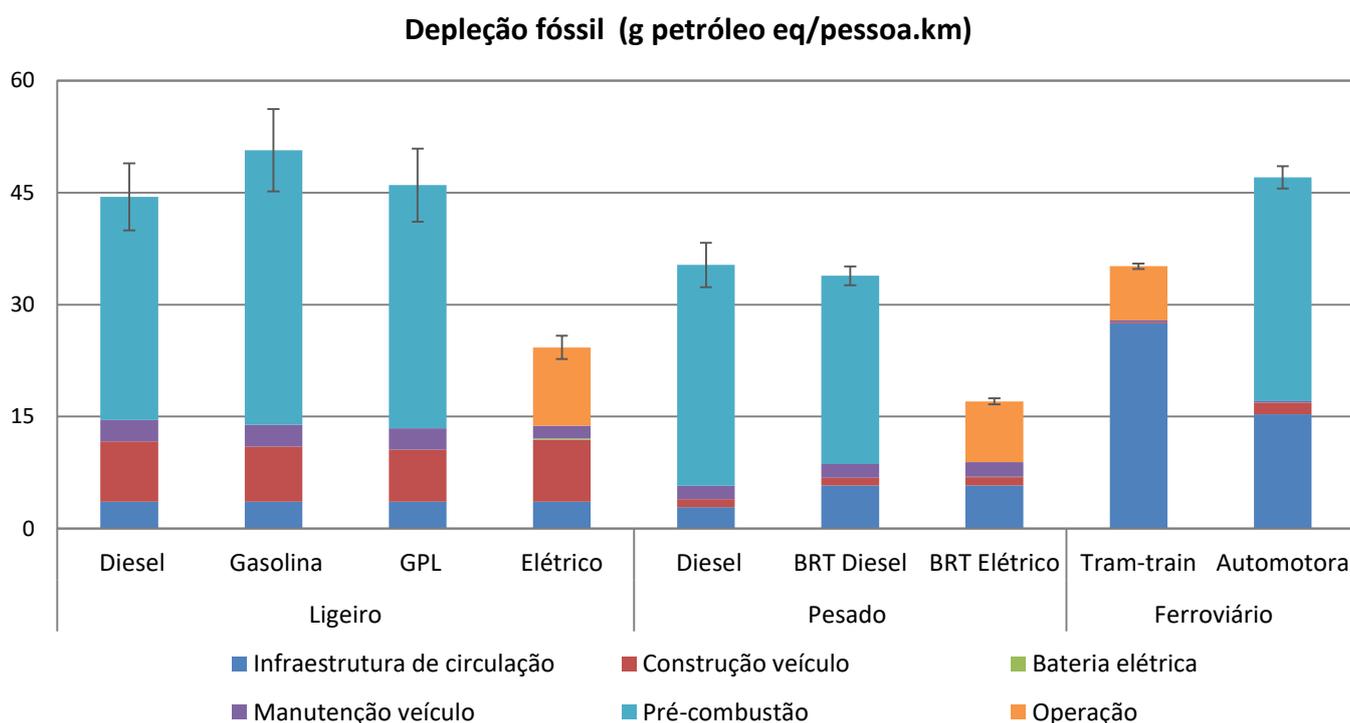


**Figura 9 - Potencial de aquecimento global dos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

Verifica-se que a fase de utilização é aquela que tem maior influência no potencial de aquecimento global na maioria dos veículos, o que se deve às emissões de CO<sub>2</sub> eq resultantes da queima dos combustíveis ou da produção de eletricidade. Os meios de transporte elétricos apresentam os menores impactos para o aquecimento global comparativamente aos restantes veículos, o que pode ser explicado pelo *mix* elétrico com forte incorporação de fontes de energia renováveis, que contribuem pouco para o aquecimento global.

Os veículos ferroviários são uma exceção, já que é a infraestrutura de circulação que contribui em grande parte para o impacto ambiental dos meios de transporte. Tal se deve ao facto de a totalidade dos impactos da construção, manutenção e fim de vida da estrada estarem associados à realização de apenas 11 viagens por dia por um único veículo. O facto de o *tram-train* ter uma contribuição muito maior da infraestrutura de circulação está relacionado com o facto de haver necessidade de eletrificar a rede de transporte, para alimentação elétrica via catenária do veículo, ao contrário do que acontece com a automotora, que apenas necessita dos carris para se deslocar, já que é um ICEV.

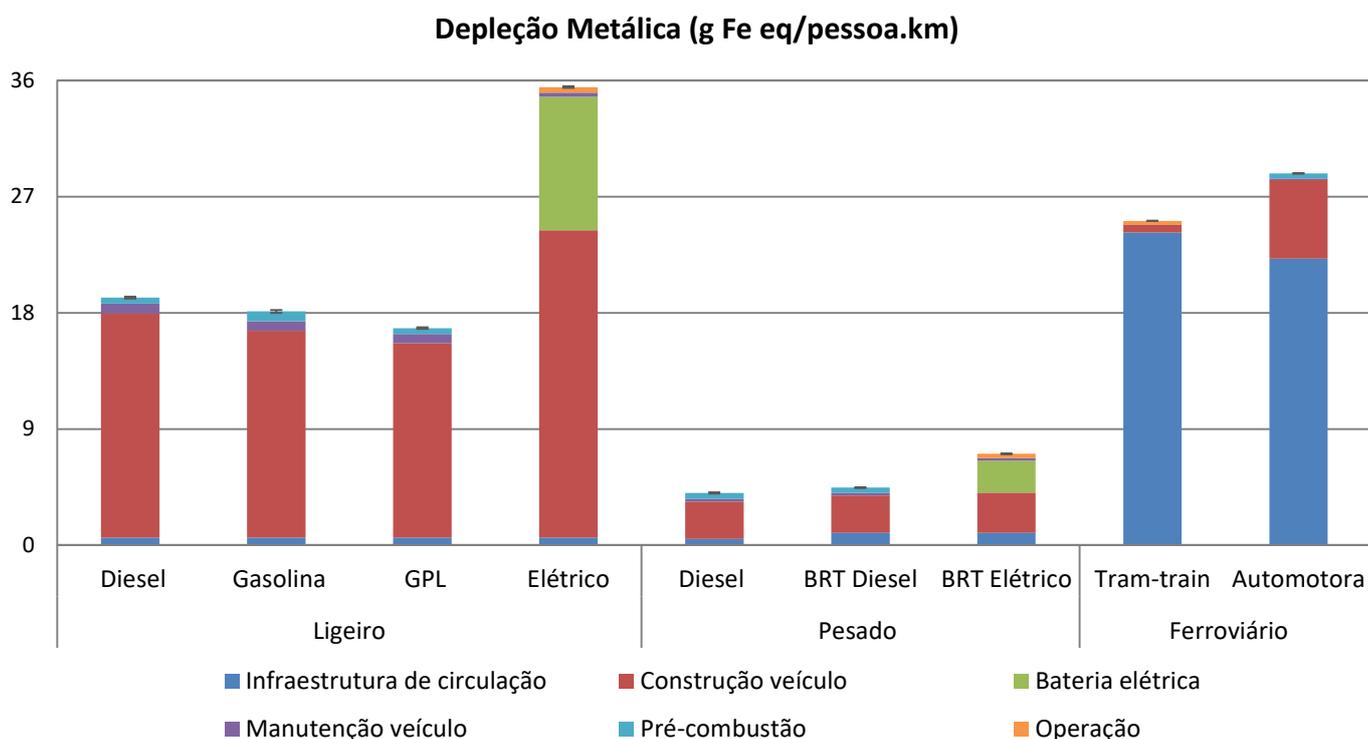
A Figura 10 apresenta os resultados para a depleção fóssil causada pelos meios de transporte suburbanos, expressos em gramas de petróleo equivalente por pessoa.km. Os meios de transporte elétricos rodoviários são os que apresentam menores impactos, devido ao impacto da pré-combustão nos restantes veículos. O BRT elétrico é o que apresenta menor impacto ambiental para o transporte de uma pessoa.km, o que se deve às diferentes taxas de ocupação entre os veículos ligeiros e pesados.



**Figura 10 - Depleção fóssil causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

A pré-combustão é a fase que mais contribui para o consumo de combustíveis fósseis devido à prospeção de petróleo e gás natural para o processamento dos combustíveis que alimentam os ICEVs. A geração de eletricidade é também realizada a partir de combustíveis fósseis, mas no *mix* elétrico médio dos anos de 2010 a 2014 estes representaram apenas 41%, o que se traduz num impacto ambiental dos veículos elétricos inferior ao dos veículos de combustão interna para a categoria de depleção fóssil.

Os resultados para a categoria de depleção metálica são apresentados na figura 11, expressos em gramas de Fe eq por pessoa.km. O veículo ligeiro elétrico é o que apresenta maior depleção metálica. Por outro lado, o autocarro diesel é o que revela menores impactes. A incerteza associada aos consumos não afeta os resultados.



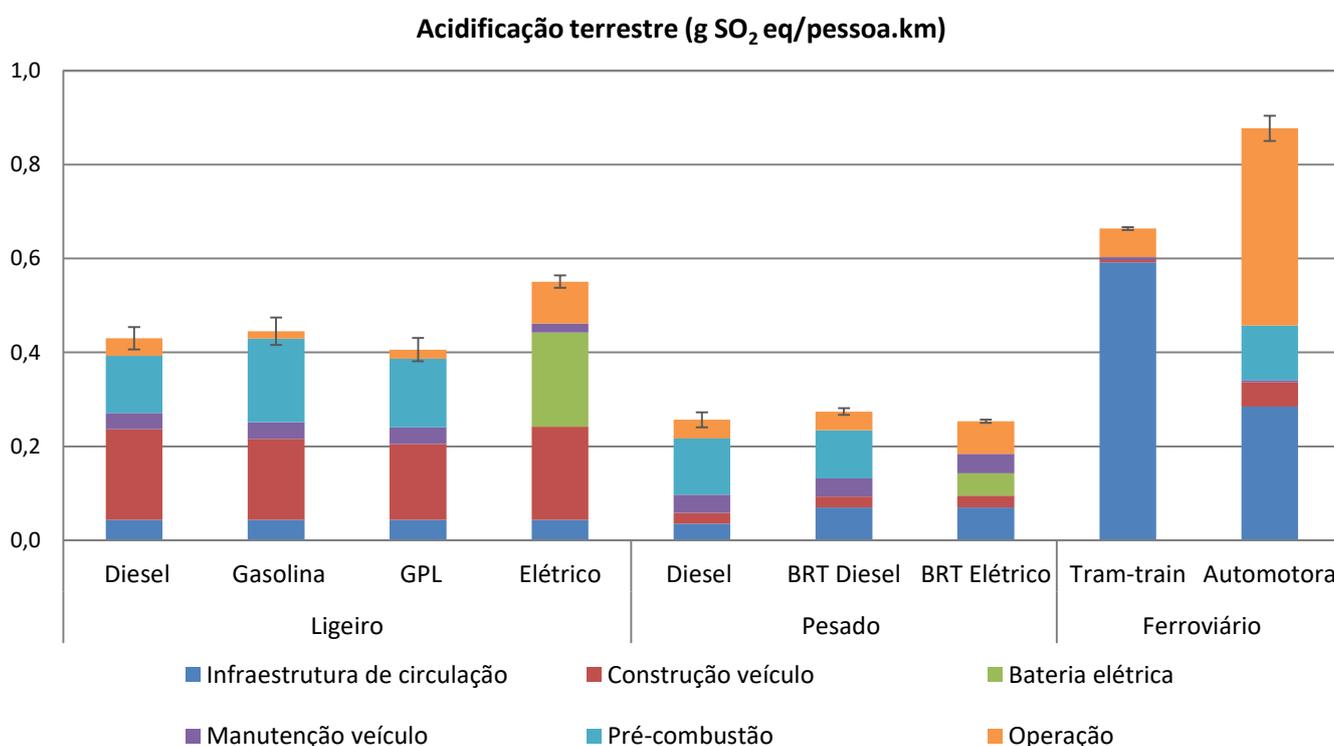
**Figura 11 - Depleção metálica causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

A construção dos veículos é a principal causa para a depleção metálica, derivado da necessidade de materiais desta categoria para a construção dos componentes e estrutura dos veículos. Também a construção das baterias implica uma grande necessidade de recorrer a matérias-primas que provocam depleção metálica. Estas duas questões aliadas fazem com que os veículos elétricos a bateria sejam os que apresentam mais impactes nesta categoria. Desta forma o veículo ligeiro elétrico é o que apresenta um impacte maior no transporte de uma pessoa.km, o que pode ser explicado pelos consumos e taxas de ocupação distintas dos veículos ligeiros e pesados.

Nos meios de transporte ferroviários, para além da grande contribuição da construção dos veículos, é a infraestrutura de circulação que apresenta maior contribuição para a

depleção metálica, o que está diretamente relacionado com as matérias primas necessárias para a construção dos carris.

A Figura 12 apresenta os resultados quanto à acidificação, expressos em gramas de SO<sub>2</sub> eq por pessoa.km. O transporte de uma pessoa é mais contributivo para a acidificação terrestre se for realizado pela automotora, devido principalmente ao grande consumo de combustível, mas também à contribuição da infraestrutura de circulação. Pelo outro lado, o autocarro diesel, BRT diesel e BRT elétrico são os que apresentam menores impactes para a acidificação terrestre, no que diz respeito ao transporte de uma pessoa.km por meio de transporte rodoviário. A incerteza associada aos consumos tem bastante influência nesta categoria de impacte ambiental.

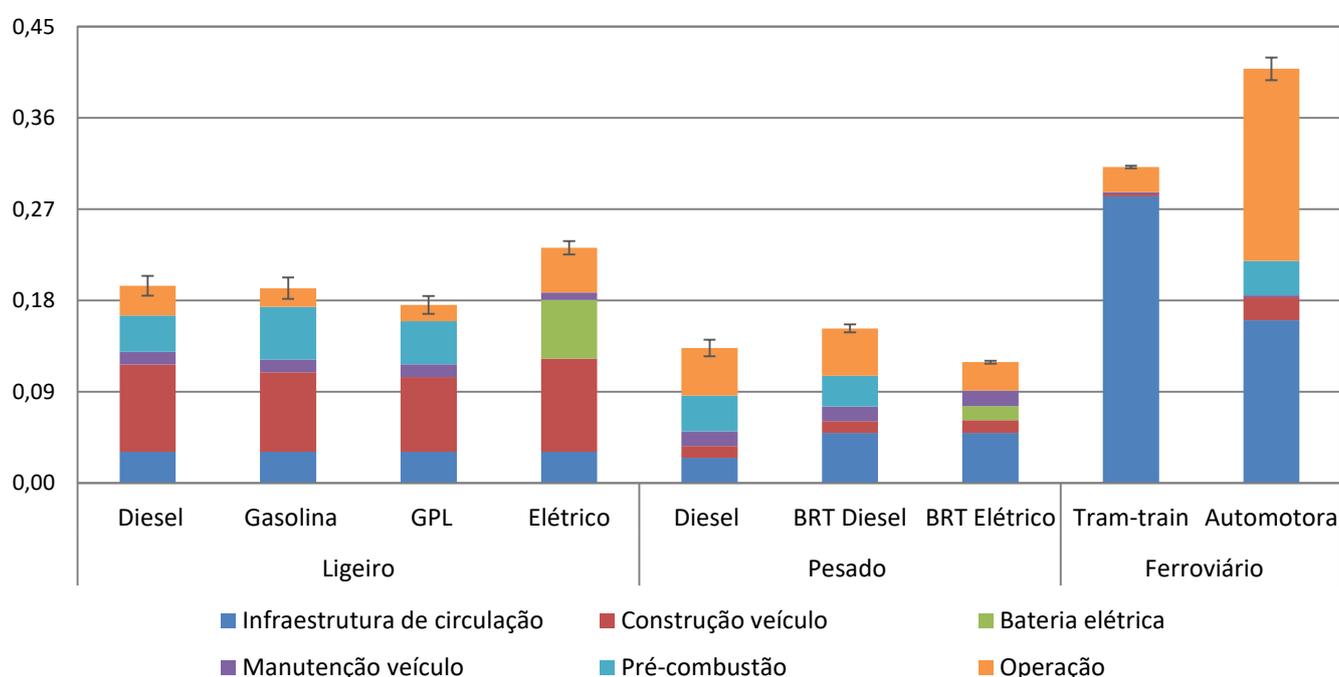


**Figura 12 - Acidificação terrestre causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

Nos ICEVs, o processamento dos combustíveis contribui muito para o impacte ambiental, devido às grandes quantidades de enxofre presentes nos recursos fósseis. Nos veículos elétricos é o sistema electroprodutor que mais contribui para os impactes, o que depende diretamente da eletricidade produzida a partir de carvão e gás natural.

A figura 13 apresenta os resultados relativos à matéria particulada, expressos em  $PM_{10}$  eq por pessoa.km. No transporte via rodoviária, o veículo ligeiro elétrico é o que apresenta maior impacte. Pelo outro lado, o BRT elétrico é o que tem menor impacte, o que pode ser justificado pelos diferentes consumos e taxas de ocupação entre os meios de transporte ligeiros e pesados. Os veículos ferroviários são os meios de transporte com maior impacte ambiental, devido à grande contribuição da infraestrutura de circulação. A incerteza associada aos consumos não põe em causa estas conclusões.

**Matéria particulada (g  $PM_{10}$  eq/pessoa.km)**

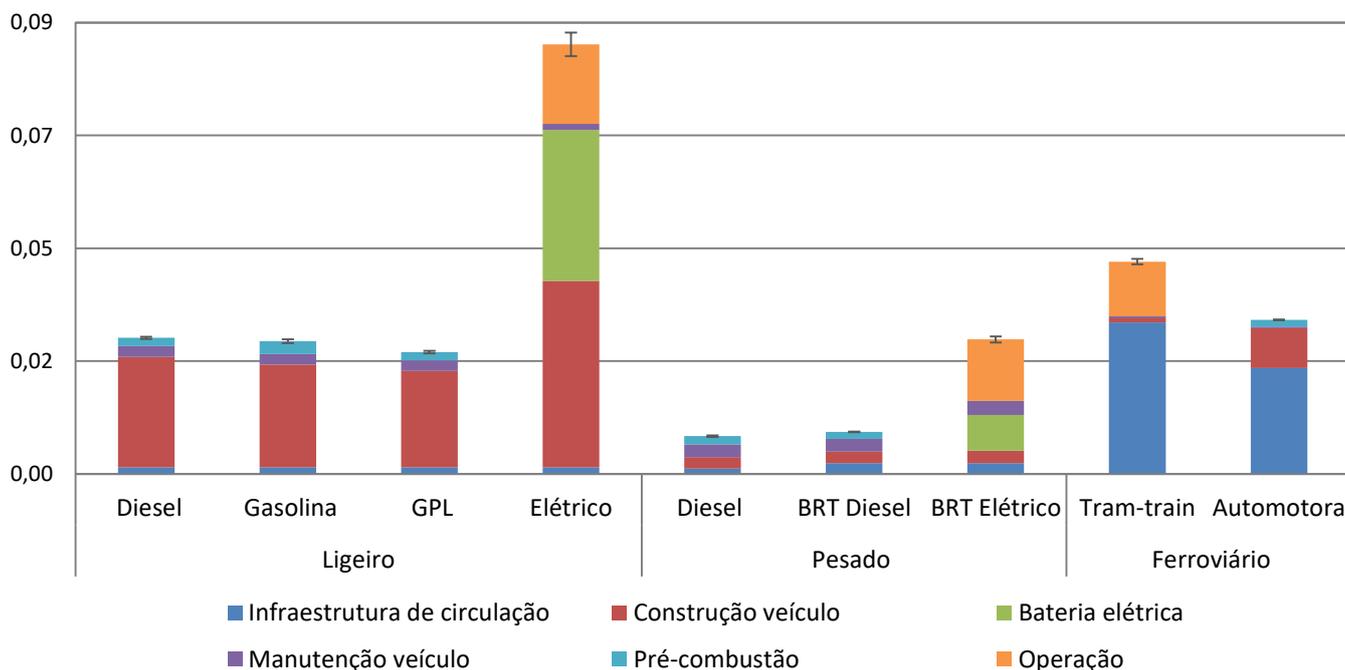


**Figura 13 - Matéria particulada libertada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

De uma forma geral estas emissões estão associadas à geração e consumo dos combustíveis nos ICEVs e na fase de operação dos veículos elétricos, consequência do consumo de eletricidade. No entanto, é de referir que as emissões não têm em conta o local onde ocorrem. A bateria também é um atributo importante nesta categoria de impacte ambiental, resultado da construção e deposição/reciclagem da mesma.

A Figura 14 apresenta os resultados relativamente à eutrofização de água doce expressa em gramas de fósforo equivalente por pessoa.km. O veículo ligeiro elétrico é o meio de transporte que evidencia maior impacto no transporte de uma pessoa.km, proveniente da construção do veículo e da bateria e da geração de eletricidade. Já o autocarro diesel apresenta os menores impactos nesta categoria ambiental. A incerteza associada aos consumos não é determinante na procura da tecnologia com menores impactos.

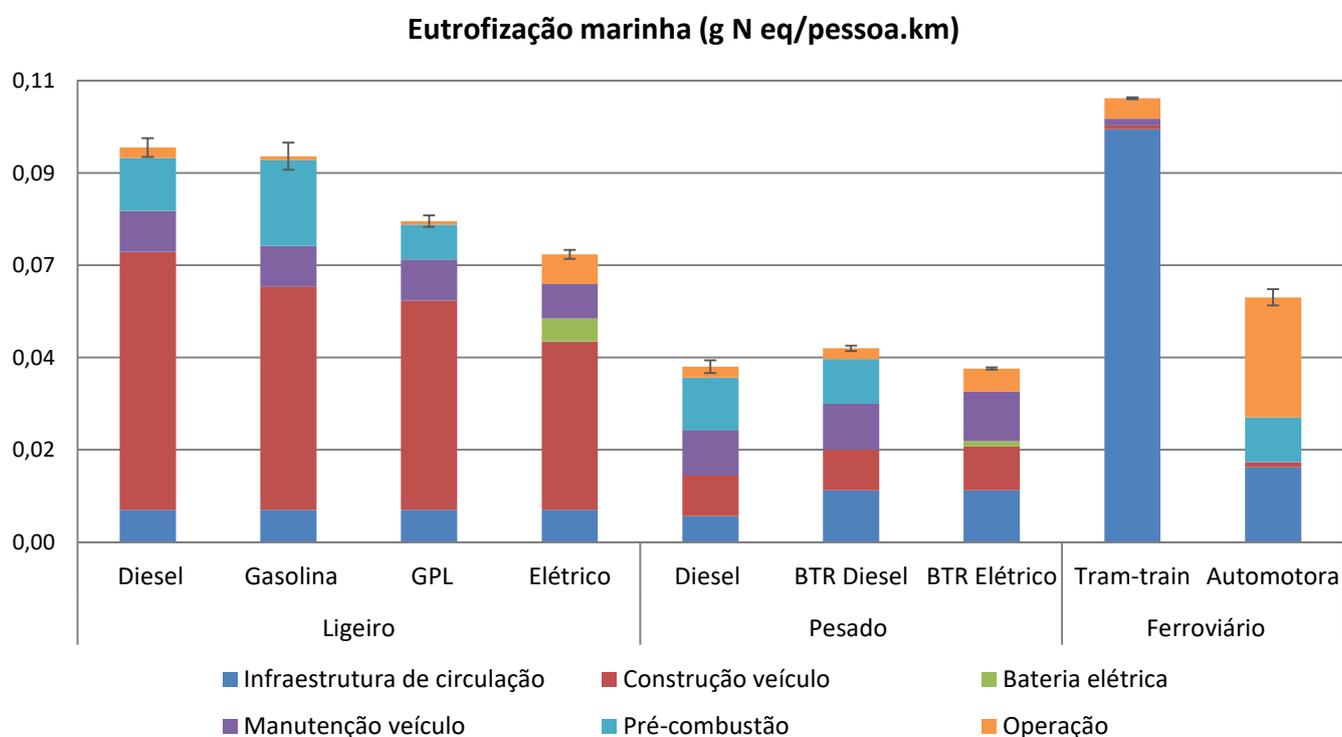
**Eutrofização de água doce (g P eq/pessoa.km)**



**Figura 14 - Eutrofização de água doce causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

Os meios de transporte elétricos de passageiros destacam-se negativamente nesta categoria, devido não só à grande responsabilidade da produção da bateria dos veículos, mas também ao consumo de eletricidade na fase do uso. O sistema electroprodutor é muito influente no impacto ambiental nesta categoria, devido à emissão de fosfatos resultantes da queima do carvão para a geração de eletricidade.

Os resultados da eutrofização marinha expressos em gramas de azoto equivalente por pessoa.km são expressos na figura 15. Os meios de transporte ferroviários são muito influenciados pela infraestrutura de circulação, que tem uma grande contribuição para a eutrofização marinha. Isto faz com que o *tram-train* seja o meio de transporte que apresenta o maior impacto para fazer a deslocação de uma pessoa.km. Já no transporte rodoviário é o veículo ligeiro a diesel que apresenta o maior impacto para a realização deste transporte. A incerteza associada aos consumos permite identificar o autocarro diesel e o BRT elétrico como os que apresentam menores impactos nesta categoria, mas não permite identificar um melhor veículo ao nível ambiental.



**Figura 15 - Eutrofização marinha causada pelos veículos suburbanos (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

A construção e manutenção dos veículos são os principais contribuintes para a eutrofização marinha em todos os veículos rodoviários. Também a pré-combustão e geração elétrica são processos que influenciam fortemente os resultados para esta categoria de impacto ambiental.

### 3.2.3. Análise suburbana: caso de estudo percurso Serpins-Coimbra

Os impactes ambientais da realização de uma viagem de Serpins para Coimbra, efetuada pelos diferentes meios de transporte nos dois percursos possíveis, rodoviário e ferroviário, são apresentados nas figuras 16 e 17. Os veículos ligeiros e o autocarro diesel realizam a viagem via estrada nacional, com uma distância de 46 km, e os veículos BRT e ferroviários realizam viagem via estrada ou ferrovia, mediante o tipo de meio de transporte, com uma distância de 35 km. Para os veículos ligeiros considerou-se uma ocupação de 1,4 passageiros, para o autocarro e os meios de transporte BRT 16 passageiros e para os ferroviários 80 passageiros por veículo.

A figura 16 apresenta os resultados para a categoria de aquecimento global, expressos em g CO<sub>2</sub> eq por pessoa.viagem Serpins-Coimbra.

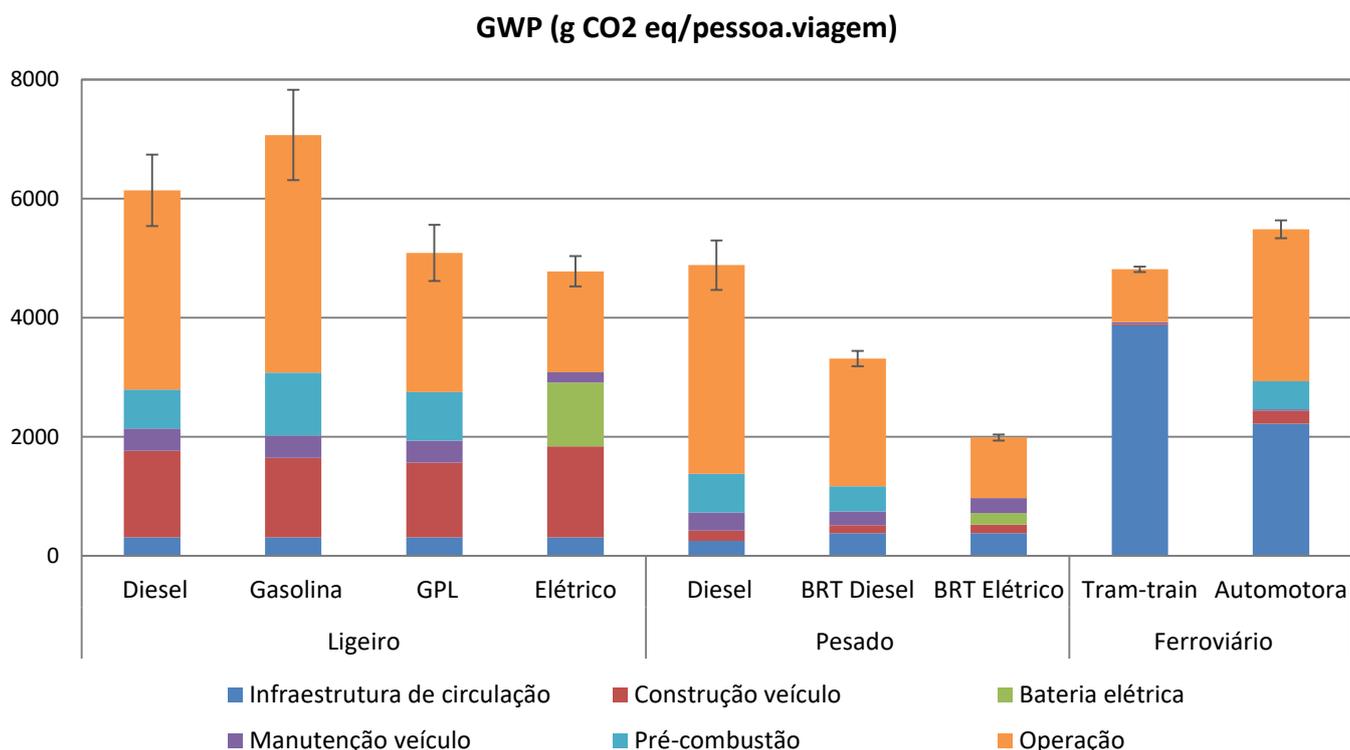
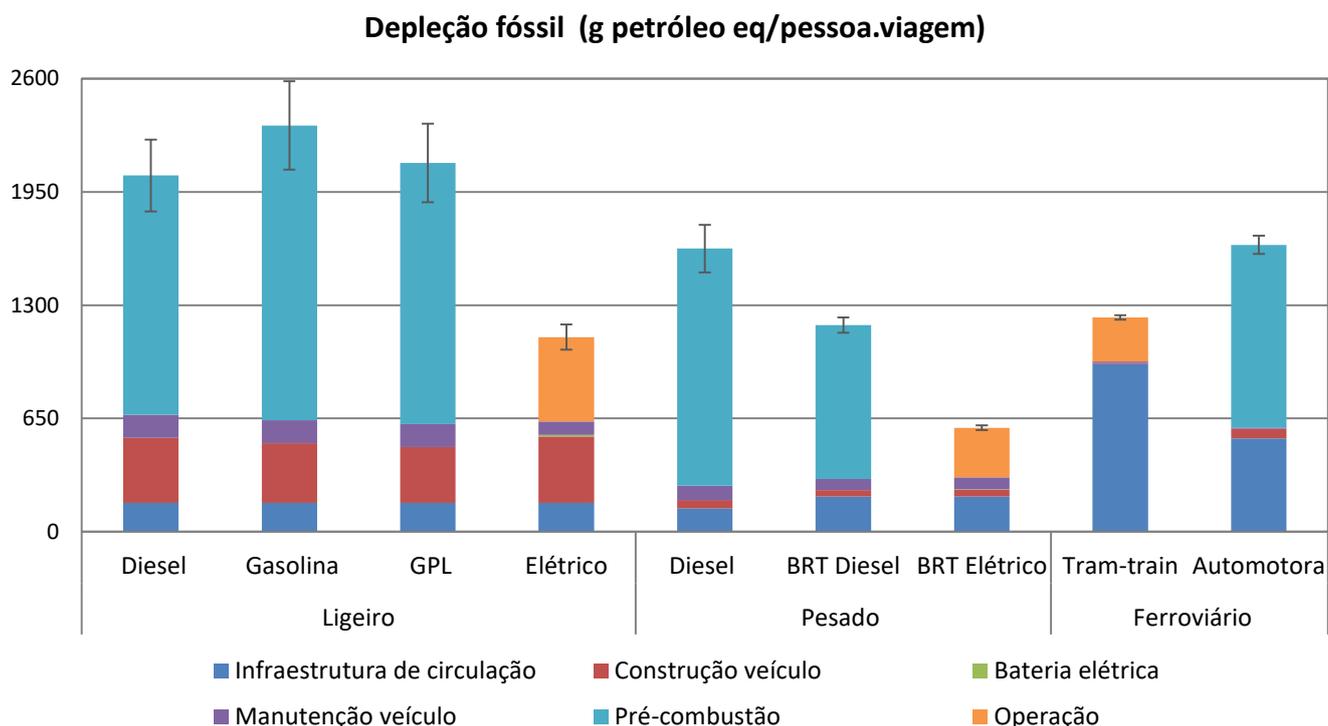


Figura 16 - Aquecimento global causado pelos veículos numa viagem Serpins-Coimbra (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)

O veículo ligeiro a gasolina apresenta o maior impacte na categoria de aquecimento global. Pelo outro lado, o BRT elétrico é o veículo que apresenta menores impactes no

transporte de uma pessoa. Ao contrário do que acontecia nos resultados apresentados para o percurso suburbano por pessoa.km, os meios de transporte ferroviários, neste caso específico, não são os que apresentam os resultados com maiores impactes. Isto deve-se ao facto das distâncias da estrada nacional e da estrada/ferrovia serem diferentes.

A figura 17 apresenta os impactes para a categoria de depleção fóssil, expressos em gramas de petróleo por pessoa.viagem.



**Figura 17 - Depleção fóssil causada pelos veículos numa viagem Serpins-Coimbra (ocupação: ligeiros 1,4; pesados 16; ferroviários 80)**

Também nesta categoria o meio de transporte ligeiro a gasolina é o que apresenta o maior impacte para o transporte de uma pessoa.viagem Serpins-Coimbra e o BRT elétrico o que apresenta menor impacte. A análise dos resultados com incerteza associada aos consumos mostra que existe alguma sobreposição dos resultados, o que não permite determinar o veículo que apresenta sempre os maiores impactes ambientais.

### 3.3. Análise de Sensibilidade

Neste capítulo é realizada uma análise de sensibilidade à taxa de ocupação dos diferentes meios de transporte. O objetivo é avaliar diferentes cenários de ocupação de passageiros para os diferentes meios de transporte e perceber os efeitos nos resultados.

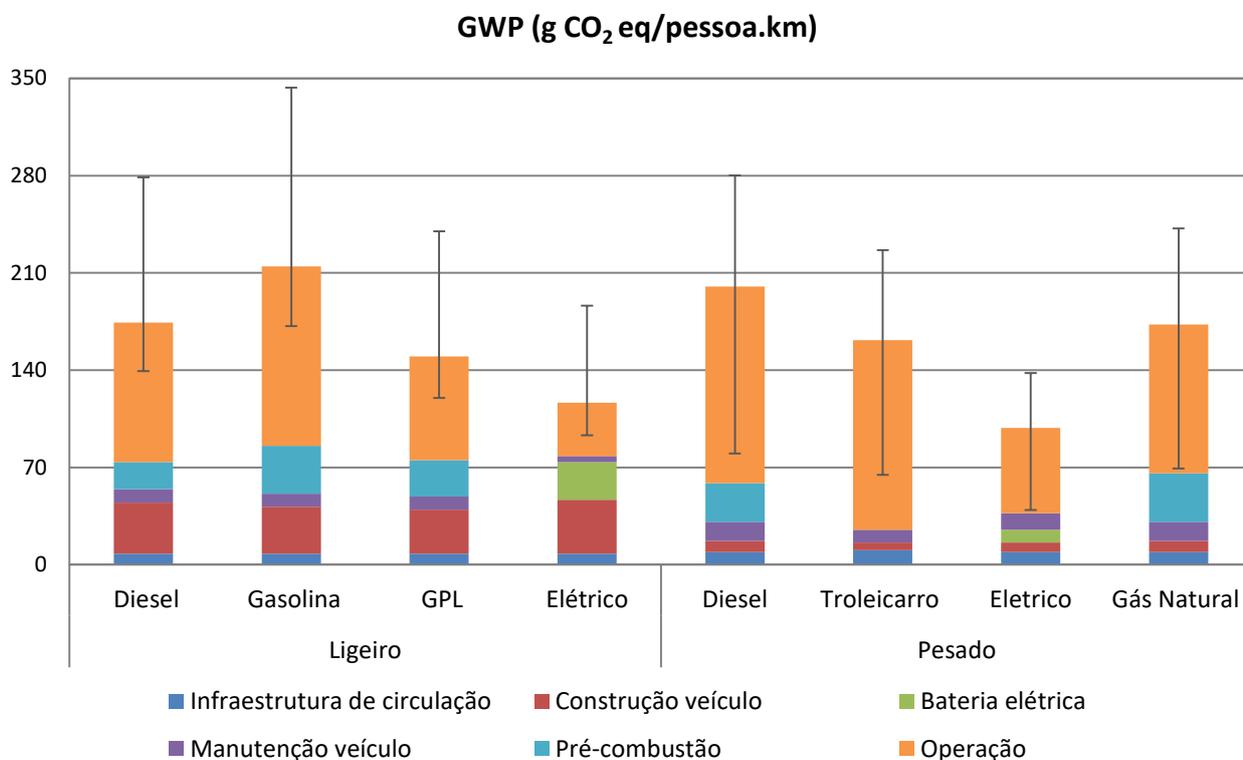
Dado que os resultados de todas as categorias de impacto ambiental são calculados para as mesmas taxas de ocupação, apenas são apresentados os resultados para as categorias de aquecimento global e depleção fóssil. Assumiu-se que o consumo médio dos veículos não varia com o aumento ou diminuição das taxas de ocupação, apesar se o consumo do veículo variar mediante o número de passageiros que transporta.

As ocupações estudadas na análise de sensibilidade, para o meio urbano e suburbano, são apresentadas na tabela 7, para os meios de transporte ligeiros, pesados e ferroviários. A ocupação mínima considerada é identificada no desvio inferior das colunas dos gráficos 18, 19, 20 e 21, da mesma forma que a ocupação máxima considerada é identificada no desvio superior.

Tabela 7 - Ocupações urbanas e suburbanas estudadas na análise de sensibilidade

	<b>Pessoas transportadas por veículo</b>	<b>Ligeiros</b>	<b>Pesados</b>	<b>Ferrovíarios</b>
Urbano	Mínimo	1	6	-
	Médio	1,2	9,6	-
	Máximo	3	16	-
Suburbano	Mínimo	1,4	9,6	50
	Médio	3	16	80
	Máximo	5	40	150

A figura 18 apresenta os impactes para a categoria de aquecimento global, expressos em gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km.

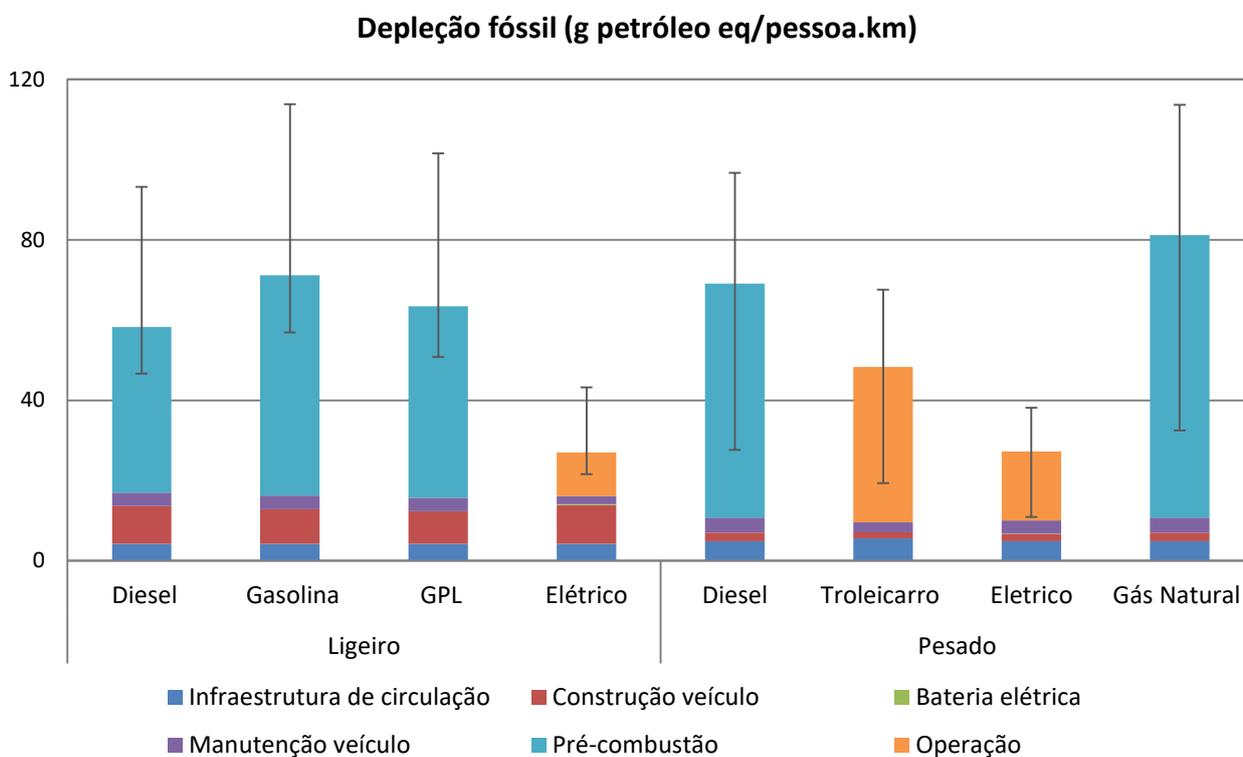


**Figura 18 - Potencial de aquecimento global dos veículos urbanos, para diferentes ocupações**

O autocarro elétrico apresenta o menor impacte nesta categoria de impacte ambiental para o transporte de uma pessoa.km, com uma ocupação de 16 pessoas. Por outro lado, o veículo ligeiro a gasolina apresenta o maior impacte, com uma ocupação de um passageiro.

Como se pode verificar na figura 18, a ocupação dos veículos influencia fortemente os impactes expressos em pessoa.km. Retira-se da análise que quanto maior a ocupação de um veículo, menores são os impactes pelo transporte de um passageiro.

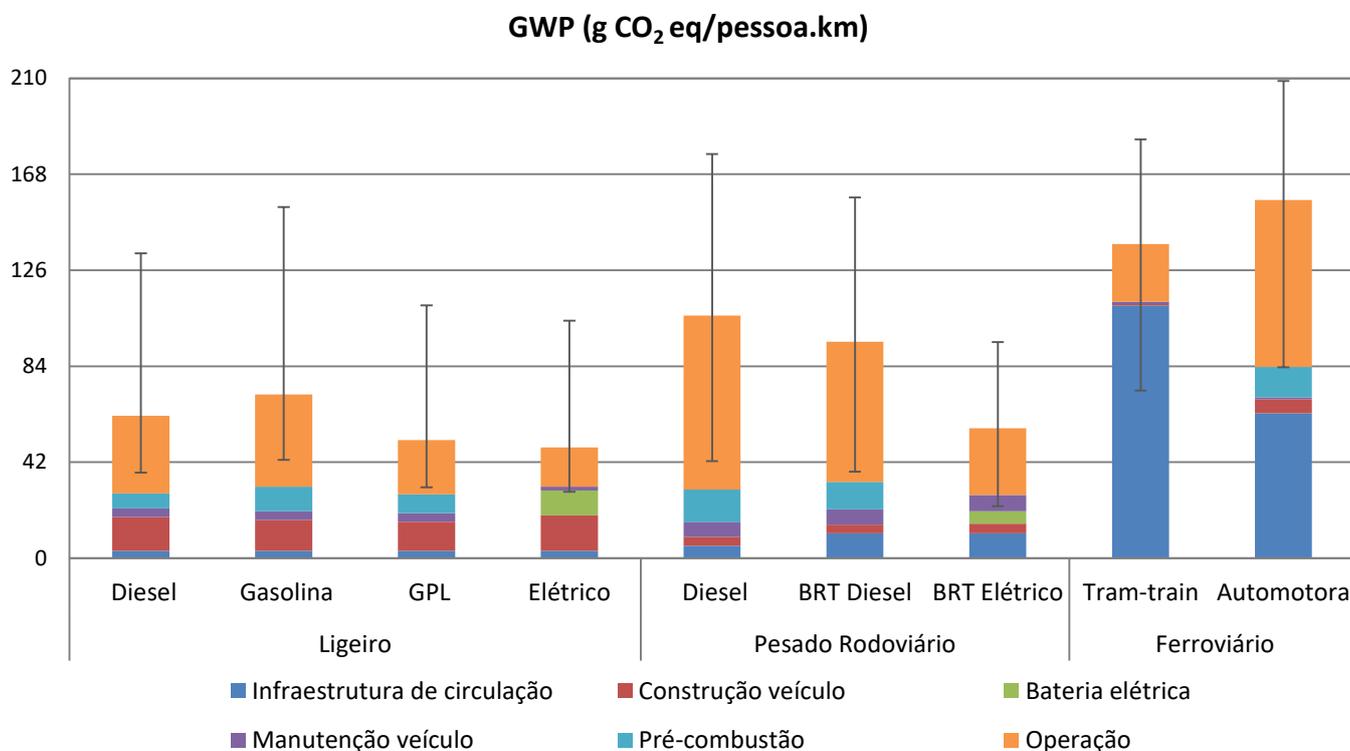
A figura 19 mostra os resultados dos veículos urbanos para a categoria de depleção fóssil. As ocupações médias e respetivos desvios são iguais às utilizadas para a categoria de aquecimento global.



**Figura 19 - Depleção fóssil causada pelos veículos urbanos, para diferentes ocupações**

O autocarro elétrico apresenta o menor impacte ambiental, para uma ocupação de 16 pessoas. Pelo outro lado, o veículo ligeiro a gasolina apresenta os maiores impactes, para uma ocupação de um passageiro. De uma forma geral, os meios de transporte elétricos são os que apresentam menores impactes nesta categoria.

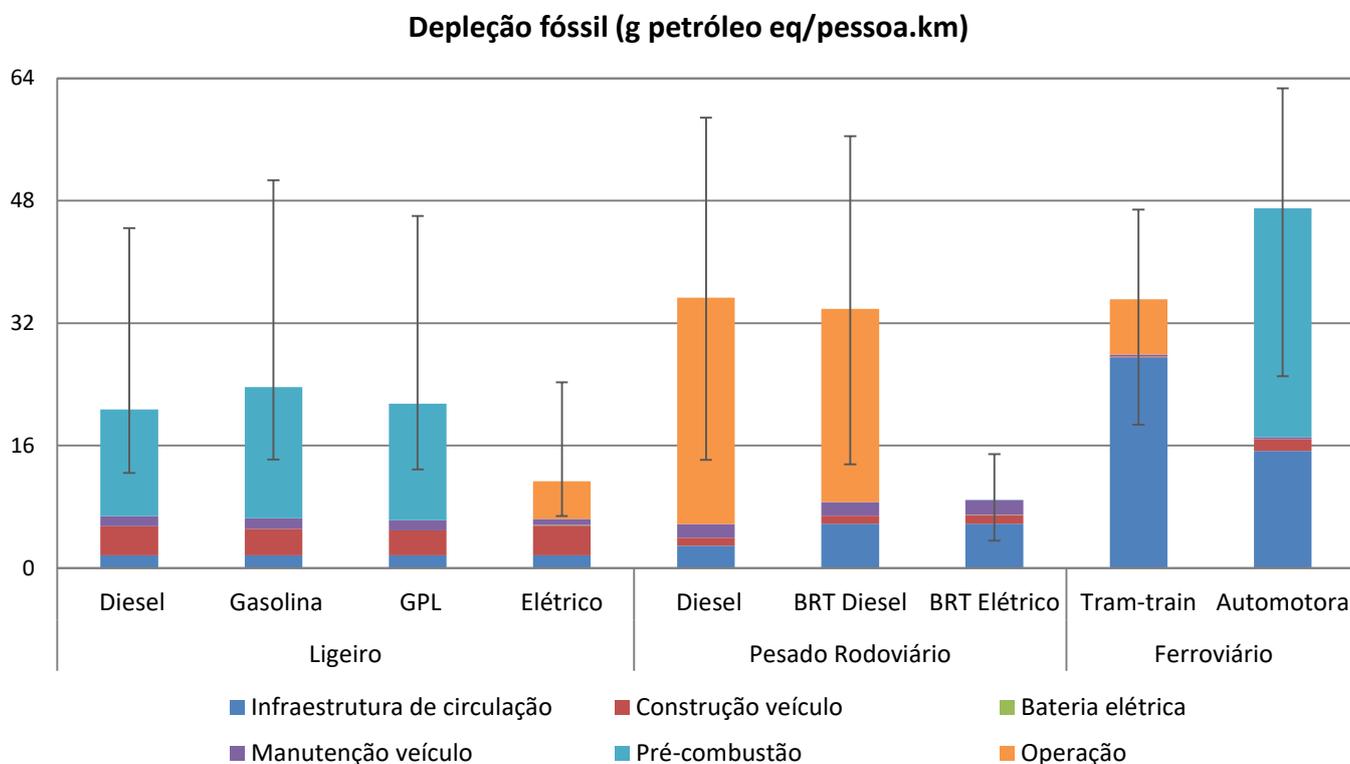
A figura 20 apresenta os resultados dos veículos suburbanos para a categoria de aquecimento global, expressos em gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km.



**Figura 20 – Potencial de aquecimento global dos veículos suburbanos, para diferentes ocupações**

O BRT elétrico apresenta o menor impacte para o transporte de uma pessoa.km para a categoria de aquecimento global, com uma ocupação de 40 pessoas. A automotora é o veículo que apresenta o maior impacte para o transporte de uma pessoa.km, com uma ocupação de 50 pessoas. Os meios de transporte ligeiros apresentam um impacte mínimo de 29,1 gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km, para uma ocupação de 5 pessoas no veículo elétrico.

A figura 21 apresenta os resultados dos veículos suburbanos para a categoria de depleção fóssil, expressos em gramas de CO<sub>2</sub> eq por pessoa.km.



**Figura 21 - Depleção fóssil causada pelos veículos suburbanos, para diferentes ocupações**

Os meios de transporte ligeiros apresentam um impacto mínimo de 6,8 gramas de petróleo eq por pessoa.km, com uma ocupação de 5 pessoas no veículo elétrico. Da análise retira-se que os veículos ligeiros são sempre mais limitados em termos de ocupação, uma vez que apenas têm uma capacidade máxima para transporte de cinco pessoas. Por outro lado, os veículos pesados têm uma maior capacidade de ocupação e, apesar de terem um impacto maior em todas as fases do ciclo de vida do veículo, conseguem fazer o transporte de passageiros com menor carga ambiental por pessoa.km.

## 4. CONCLUSÕES

A presente dissertação apresenta um estudo de avaliação de ciclo de vida de sistemas alternativos para transporte urbano e suburbano na cidade de Coimbra, com o objetivo de comparar ambientalmente diferentes tipos de meios de transporte de passageiros. Os objetos de estudo para o meio urbano são quatro tipos de veículos ligeiros (diesel, gasolina, GPL e elétrico) e 4 tipos de autocarros (diesel, gás natural, troleicarro e elétrico). Os objetos de estudo para o meio suburbano são quatro tipos de veículos ligeiros (diesel, gás natural, troleicarro e elétrico), 3 tipos de veículos pesados rodoviários (autocarro diesel, BRT elétrico e BRT diesel) e 2 tipos de veículos ferroviários (automotora e *tram-train*). Adicionalmente realiza-se uma análise ao percurso suburbano Serpins-Coimbra, incluindo a possibilidade de deslocação pela via atual ou a reativação da antiga linha de comboio. Realiza-se ainda uma análise de sensibilidade às taxas de ocupação dos meios de transporte, com o objetivo de avaliar a sua influência nos resultados.

A metodologia adotada foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e os resultados foram alcançados com recurso ao método ReCiPe. Relativamente aos meios urbano e suburbano, os resultados mostram que o veículo pesado elétrico é o que apresenta, de uma forma geral, resultados mais favoráveis para ambos os meios, pois apresenta menores impactes ambientais nas categorias de aquecimento global, depleção fóssil, acidificação terrestre, PM<sub>10</sub> e eutrofização marinha.

Com a realização desta dissertação conclui-se que, para o meio urbano, os veículos elétricos apresentam impactes inferiores aos veículos de combustão interna (ICEVs) para todas as categorias ambientais, exceto na eutrofização de água doce. O veículo pesado elétrico apresenta os menores impactes nas categorias de aquecimento global, acidificação terrestre, eutrofização marinha e matéria particulada (PM<sub>10</sub>). Já o veículo ligeiro elétrico apresenta os melhores resultados para a categoria de depleção fóssil e o troleicarro para a categoria de depleção metálica.

Para o meio suburbano, conclui-se que o veículo pesado diesel apresenta os menores impactes para as categorias de depleção metálica, acidificação terrestre e eutrofização de água doce. Por outro lado, o *Bus Rapid Transit* (BRT) elétrico apresenta os melhores

resultados para as restantes categorias de impacte ambiental. O BRT elétrico é ainda o veículo que apresenta os melhores resultados para as categorias ambientais analisadas no trajeto Serpins-Coimbra.

Os veículos ferroviários apresentam impactes ambientais muito elevados, principalmente devido à grande contribuição das infraestruturas de circulação destes meios de transporte para as diferentes categorias de impacte. Esta contribuição é particularmente elevada porque estes veículos realizam o transporte numa via construída especificamente para a sua circulação num único percurso (11 viagens/dia). A infraestrutura de circulação só revelou impactes elevados para o transporte ferroviário, para os restantes meios de transporte representa sempre impactes pouco significativos.

Da realização deste trabalho conclui-se ainda que as tecnologias elétricas se revelam muito promissoras no que se refere à diminuição dos impactes ambientais, muito devido à evolução do sistema electroprodutor nacional, que tem incorporado fortemente fontes renováveis na geração de eletricidade. Também as baterias têm grande contribuição para os impactes em veículos 100% elétricos a bateria nas categorias de depleção metálica, acidificação terrestre e eutrofização de água doce.

Da análise de sensibilidade às taxas de ocupação conclui-se que a ocupação é um aspeto crítico quando queremos avaliar o transporte de pessoas para diferentes meios de transporte. Com base na análise efetuada, verifica-se que os meios de transporte pesados rodoviários permitem o transporte de pessoas com menor impacte ambiental do que os veículos ligeiros. Isto porque os veículos ligeiros apenas podem transportar no máximo cinco pessoas. Apesar dos impactes ambientais de deslocação de um veículo pesado serem maiores do que os de um veículo ligeiro, o transporte de uma pessoa num veículo pesado é realizado com menores impactes, a partir de ocupações entre 20 e 31 pessoas por veículo (mediante o tipo de veículo e a categoria de impacte ambiental considerada). Considerando a ocupação máxima para cada meio de transporte, verifica-se que, quer para meio urbano, quer para meio suburbano, os veículos pesados são os que apresentam aquecimento global mais reduzido, em particular o veículo pesado elétrico e o BRT elétrico. Desta forma, sensibilizar as pessoas relativamente aos impactes ambientais da mobilidade pode levar a uma substituição dos veículos individuais pelos transportes públicos, o que levaria a uma maior ocupação dos veículos e à diminuição dos impactes por pessoa transportada.

#### **4.1. Principais limitações e Trabalho Futuro**

A análise de sensibilidade é realizada com base no pressuposto de que o consumo médio dos veículos não aumenta ou diminui, mesmo com um número maior ou menor de passageiros transportados. Tal pode não ter uma influência muito significativa, mas ainda assim deveria ser analisado em trabalhos futuros.

Outra limitação é o facto de se ter considerado que as emissões de NO<sub>x</sub> libertadas durante a fase de combustão são semelhantes para todos os veículos da mesma tecnologia e categoria, apesar de terem consumos diferentes. Assumiu-se que as emissões seriam as máximas de acordo com as normas euro do limite de emissões, embora as emissões de NO<sub>x</sub> estejam relacionadas com o consumo de combustível e tipo de percurso, e não só com a tecnologia adotada. (Weiss et al. 2012)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Manan, Amir F N. “Uncertainty and Differences in GHG Emissions between Electric and Conventional Gasoline Vehicles with Implications for Transport Policy Making.” *Energy Policy* 87 (2015): 1–7.
- Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, A., Slowik, P., & Tu, N. (2012). Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle Kimberly Aguirre, (June), 1–33.
- Ally, J., & Pryor, T. (2007). “Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems”, *Journal of Power Sources*, 170(2), 401–411.
- APA (2012). “Utilização coletiva do carro (“car sharing”): um por todos e todos por um!”, acessado a 8 de junho de 2016, em <http://www.apambiente.pt/>.
- Baptista, Patrícia C. et al. “Evaluation of the Benefits of the Introduction of Electricity Powered Vehicles in an Island.” *Energy Conversion and Management* 76 (2013): 541–553.
- Bauer, Christian et al. “The Environmental Performance of Current and Future Passenger Vehicles: Life Cycle Assessment Based on a Novel Scenario Analysis Framework.”, *Applied Energy* 157 (2015): 871–883.
- Bernardino, S. (2008). “Critical Review A Comparison of Emissions from Vehicles Fueled with Diesel or Compressed Natural Gas”, 42(17), 6437–6445.
- BOMBARDIER - <http://www.bombardier.com/> – acessado a 6 de abril de 2016.
- BYD - <http://www.byd.com> – acessado a 5 de abril de 2016.
- Carris - <http://carris.transporteslisboa.pt/> - acessado a 11 de maio de 2016.
- Chester, M. V, & Horvath, A. (2009). “Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains”, *Environmental Research Letters*, 4(2), 024008.
- Chester, M. V., Horvath, A., & Madanat, S. (2010). “Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions”, *Atmospheric Environment*, 44(8), 1071–1079

- Chester, M (2008). “Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil e do Ambiente, Universidade da Califórnia, Berkeley.
- Chester, M., Pincetl, S., Elizabeth, Z., Eisenstein, W., & Matute, J. (2013). “Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals”, *Environmental Research Letters*, 8(1), 015041.
- Cooney, G., Hawkins, T. R., & Marriott, J. (2013). “Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses”, *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), 689–699.
- Cooney, G. (2011). “Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses”, Tese de Mestrado em Ciências, Universidade de Pittsburgh.
- Curran, M. (1996). “Environmental Life-Cycle Assessment”, Mc Graw Hill.
- Eckelman, M. J. (2013). “Life cycle assessment in support of sustainable transportation”, *Environmental Research Letters*, 8(2), 021004.
- DAT (2016). “Guide on the fuel economy, CO2 emissions and power consumption of all new passenger car models, offered for sale on the German market”,
- DCLIMA (2016). “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (NIR 2016 – emissões 2014)”, acessado a 15 de agosto de 2016, em <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=150>.
- DGEG (2016). “Energia em Portugal”. Acessado a 3 de agosto de 2016, em [http://www.apren.pt/fotos/newsletter/conteudos/energia\\_em\\_portugal\\_2014\\_dgeg\\_1459441498.pdf](http://www.apren.pt/fotos/newsletter/conteudos/energia_em_portugal_2014_dgeg_1459441498.pdf).
- Faria, R., Moura, P., Delgado, J., & De Almeida, A. T. (2012). “A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system”, *Energy Conversion and Management*, 61, 19–30.
- Freire, F., and P. Marques. “Electric Vehicles in Portugal: An Integrated Energy, Greenhouse Gas and Cost Life-Cycle Analysis.” *2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)* (2012): 1–6.
- Frischknecht, Rolf, and Karin Flury. “Life Cycle Assessment of Electric Mobility: Answers and Challenges-Zurich, April 6, 2011.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 16.7 (2011): 691–695.

- Garcia, Rita, Pedro Marques, and Fausto Freire. "Life-Cycle Assessment of Electricity in Portugal.", *Applied Energy* 134 (2014): 563–572.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). "ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation.", *A Life Cycle Impact ...*, 133.
- Guinée, J. (2002). "Handbook on life cycle assessment", Kluwer Academic Publishers, Springer.
- Hawkins, T. R., Gausen, O. M., & Strømman, A. H. (2012). "Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 997–1014.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles", *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64.
- ISO 14040 (2006). —Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. EN ISO 14040:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- ISO 14044 (2006). —Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. EN ISO 14044:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- JRC European commission. "ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context", N.p., 2011. Web.
- Jungbluth, Niels (2012). "Characteristics of the Products",ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH.
- Kliucininkas, L., Matulevicius, J., & Martuzevicius, D. (2012). "The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses". *Journal of Environmental Management*, 99, 98–103.
- Kato, H., Shibahara, N., & Watanabe, Y. (2016). "A Systematic Approach for Evaluating Public Transport Systems through LCA", (February).
- Lucas, A., Alexandra Silva, C., & Costa Neto, R. (2012). "Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles", *Energy Policy*, 41, 537–547.

- Maclean, H. L., & Lave, L. B. (2003). “Life Cycle Assessment of Automobile / Fuel Options”, *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5445–5452.
- Majeau-bettez, G., Hawkins, T. R., & Strømman, A. H. (2011). “Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles”, 4548–4554.
- Mendes, C. (2009). “Optimização da Afetação de Recursos à Produção de Serviços da CP Regional”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Método ReCiPe – [www.lcia-recipe.net/](http://www.lcia-recipe.net/) - acedido a 12 de agosto de 2016.
- Metro do Porto (2013). “Relatório e Contas de 2013”. Acedido a 21 de março de 2016, em <http://www.metroporto.pt/>.
- Metro do Porto (2014). “Relatório e Contas de 2014”. Acedido a 21 de março de 2016, em <http://www.metroporto.pt/frontoffice/pages/338>.
- Metro do Porto (2014). “Relatório de Sustentabilidade”. Acedido a 21 de março de 2016, em <http://www.metroporto.pt/>.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2010).” Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles”, *Environmental Science and Technology*, 44(17), 6550–6556.
- REN (2015). “Relatório e Contas 2015”. Acedido a 3 de setembro de 2016, em <http://www.ren.pt/>
- Santos, P. M. (2014). “Sustainable Trolleybus System: Rectifier Substation Technology Improvement for Energy Efficiency and Operational Cost Reduction”,
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). “Lithium batteries: Status, prospects and future”, *Journal of Power Sources*, 195, 2419–2430.
- Simic, D. (2013). “A Life Cycle Assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery Parameters Settings for EVs”, *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 1–11.
- SMTUC (2009). “Relatório de Gestão e Documentos Financeiros”. Acedido a 25 de fevereiro de 2016, em <http://www.smtuc.pt/>.

- SMTUC (2011). “Relatório de Gestão e Documentos Financeiros”. Acedido a 25 de fevereiro de 2016, em <http://www.smtuc.pt/>.
- SMTUC (2012). “Relatório de Gestão e Documentos Financeiros”. Acedido a 25 de fevereiro de 2016, em <http://www.smtuc.pt/>.
- SMTUC (2014). “Relatório de Gestão e Contas”. Acedido a 25 de fevereiro de 2016, em <http://www.smtuc.pt/>.
- Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., Tuchschnid, M. (2007) Transport Services.ecoinvent report no. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Weiss, Martin et al. “Will Euro 6 Reduce the NO<sub>x</sub> Emissions of New Diesel Cars? - Insights from on-Road Tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS)”, *Atmospheric Environment* 62.2 (2012): 657–665.
- Zackrisson, Mats, Lars Avellán, and Jessica Orlenius. “Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles – Critical Issues.”, *Journal of Cleaner Production* 18.15 (2010): 1519–1529.
- Zimmermann, B., Baumann, M., Simon, B., Dura, H., & Weil, M. (2013). “A comparative analysis of the cumulative energy demand of stationary grid-integrated battery systems”, 248–253.

## ANEXO A - RESULTADOS DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 8 – Resultados dos veículos urbanos para a categoria de aquecimento global (g CO<sub>2</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	7,9	36,9	9,5	-	19,7	100,3	174,3
	<b>Gasolina</b>	7,9	33,8	9,5	-	34,3	129,1	214,6
	<b>GPL</b>	7,9	31,7	9,5	-	26,0	74,8	149,9
	<b>Elétrico</b>	7,9	38,7	4,4	27,2	-	38,3	116,6
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	9,1	7,9	13,8	-	27,8	141,4	200,1
	<b>Troleiarro</b>	10,5	5,3	9,3	-	-	136,5	161,6
	<b>Elétrico</b>	9,1	6,8	11,9	9,3	-	61,4	98,5
	<b>Gás Natural</b>	9,1	7,9	13,9	-	35,4	107,2	172,9

Tabela 9 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de aquecimento global (g CO<sub>2</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	6,8	31,6	8,1	-	16,9	86,0	133,5
	<b>Gasolina</b>	6,8	29,0	8,1	-	29,4	110,7	153,6
	<b>GPL</b>	6,8	27,2	8,1	-	22,3	64,1	110,6
	<b>Elétrico</b>	6,8	33,2	3,8	23,3	-	36,8	103,8
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	5,4	3,8	6,6	-	14,1	76,1	106,1
	<b>BRT Diesel</b>	10,9	3,8	6,6	-	12,0	61,3	94,7
	<b>BRT Elétrico</b>	10,9	4,1	7,1	5,6	-	29,1	56,8
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	110,6	0,5	1,0	-	-	25,4	137,5
	<b>Automotora</b>	63,3	6,2	0,8	-	13,3	73,0	156,7

## ANEXO B - RESULTADOS DA DEPLEÇÃO FÓSSIL PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 10 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de depleção fóssil (g petróleo eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção	Manutenção	Bateria	Pré-	Operação	Total
			veículo	veículo	elétrica	combustão		
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	4,21	9,44	3,35	-	41,26	-	58,26
	<b>Gasolina</b>	4,21	8,65	3,35	-	54,93	-	71,14
	<b>GPL</b>	4,21	8,11	3,35	-	47,81	-	63,48
	<b>Elétrico</b>	4,21	9,67	1,97	0,21	-	10,95	27,01
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	4,83	2,17	3,76	-	58,34	-	69,10
	<b>Troleicarro</b>	5,60	1,45	2,52	-	-	38,70	48,28
	<b>Elétrico</b>	4,83	1,87	3,24	0,07	-	17,25	27,26
	<b>Gás Natural</b>	4,83	2,17	3,77	-	68,97	-	81,18

Tabela 11 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de depleção fóssil (g petróleo eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção	Manutenção	Bateria	Pré-	Operação	Total
			veículo	veículo	elétrica	combustão		
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	3,61	8,09	2,87	-	29,87	-	44,44
	<b>Gasolina</b>	3,61	7,41	2,87	-	36,79	-	50,68
	<b>GPL</b>	3,61	6,96	2,87	-	32,57	-	46,00
	<b>Elétrico</b>	3,61	8,28	1,69	0,18	-	10,51	24,27
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	2,90	1,04	1,80	-	29,57	-	35,31
	<b>BRT Diesel</b>	5,79	1,04	1,80	-	25,24	-	33,87
	<b>BRT Elétrico</b>	5,79	1,12	1,94	0,04	-	8,14	17,04
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	27,51	0,12	0,25	-	-	7,25	35,14
	<b>Automotora</b>	15,30	1,54	0,24	-	29,94	-	47,02

## ANEXO C - RESULTADOS DA DEPLEÇÃO METÁLICA PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 12 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de depleção metálica (g Fe eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,69	20,27	0,86	-	0,67	-	22,49
	<b>Gasolina</b>	0,69	18,70	0,86	-	1,12	-	21,37
	<b>GPL</b>	0,69	17,54	0,86	-	0,65	-	19,75
	<b>Elétrico</b>	0,69	27,77	0,38	12,06	-	0,44	41,34
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	0,79	6,06	0,40	-	0,94	-	8,19
	<b>Troleicarro</b>	0,92	4,06	0,27	-	-	1,55	6,80
	<b>Elétrico</b>	0,79	5,22	0,34	4,11	-	0,69	11,15
	<b>Gás Natural</b>	0,79	6,08	0,40	-	0,87	-	8,58

Tabela 13 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de depleção metálica (g Fe eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,59	17,37	0,74	-	0,48	-	19,18
	<b>Gasolina</b>	0,59	16,03	0,74	-	0,75	-	18,11
	<b>GPL</b>	0,59	15,04	0,74	-	0,44	-	16,81
	<b>Elétrico</b>	0,59	23,80	0,33	10,34	-	0,42	35,48
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	0,48	2,90	0,19	-	0,48	-	4,05
	<b>BRT Diesel</b>	0,95	2,90	0,19	-	0,41	-	4,45
	<b>BRT Elétrico</b>	0,95	3,13	0,21	2,46	-	0,32	7,07
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	24,22	0,60	0,01	-	-	0,29	25,12
	<b>Automotora</b>	22,20	6,08	0,12	-	0,40	-	28,81

## ANEXO D - RESULTADOS DA ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 14 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de acidificação terrestre (g SO<sub>2</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,05	0,22	0,04	-	0,17	0,04	0,53
	<b>Gasolina</b>	0,05	0,20	0,04	-	0,27	0,02	0,58
	<b>GPL</b>	0,05	0,19	0,04	-	0,21	0,02	0,52
	<b>Elétrico</b>	0,05	0,23	0,02	0,23	-	0,09	0,63
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	0,06	0,05	0,08	-	0,24	0,07	0,49
	<b>Troleicarro</b>	0,07	0,03	0,05	-	-	0,33	0,48
	<b>Elétrico</b>	0,06	0,04	0,07	0,08	-	0,15	0,39
	<b>Gás Natural</b>	0,06	0,05	0,08	-	0,60	0,08	0,50

Tabela 15 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de acidificação terrestre (g SO<sub>2</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,04	0,19	0,04	-	0,12	0,04	0,43
	<b>Gasolina</b>	0,04	0,17	0,04	-	0,18	0,02	0,45
	<b>GPL</b>	0,04	0,16	0,04	-	0,15	0,02	0,41
	<b>Elétrico</b>	0,04	0,20	0,02	0,20	-	0,09	0,55
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	0,04	0,02	0,04	-	0,12	0,04	0,26
	<b>BRT Diesel</b>	0,07	0,02	0,04	-	0,10	0,04	0,27
	<b>BRT Elétrico</b>	0,07	0,02	0,04	0,05	-	0,07	0,25
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	0,59	0,00	0,01	-	-	0,06	0,66
	<b>Automotora</b>	0,28	0,05	0,00	-	0,12	0,42	0,88

## ANEXO E - RESULTADOS DA PM<sub>10</sub> PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 16 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de PM<sub>10</sub> (g PM<sub>10</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,036	0,100	0,015	-	0,049	0,034	0,235
	<b>Gasolina</b>	0,036	0,092	0,015	-	0,078	0,021	0,241
	<b>GPL</b>	0,036	0,086	0,015	-	0,062	0,019	0,218
	<b>Elétrico</b>	0,036	0,107	0,009	0,067	-	0,047	0,266
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	0,041	0,025	0,030	-	0,070	0,078	0,243
	<b>Troleicarro</b>	0,048	0,017	0,020	-	-	0,132	0,216
	<b>Elétrico</b>	0,041	0,021	0,026	0,023	-	0,059	0,170
	<b>Gás Natural</b>	0,041	0,025	0,030	-	0,141	0,033	0,204

Tabela 17 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de PM<sub>10</sub> (g PM<sub>10</sub> eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,031	0,086	0,013	-	0,036	0,029	0,195
	<b>Gasolina</b>	0,031	0,078	0,013	-	0,052	0,018	0,192
	<b>GPL</b>	0,031	0,074	0,013	-	0,043	0,016	0,176
	<b>Elétrico</b>	0,031	0,092	0,007	0,058	-	0,044	0,232
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	0,025	0,012	0,014	-	0,035	0,053	0,133
	<b>BRT Diesel</b>	0,049	0,012	0,014	-	0,030	0,047	0,152
	<b>BRT Elétrico</b>	0,049	0,013	0,015	0,014	-	0,028	0,119
<b>ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	0,283	0,002	0,002	-	-	0,025	0,311
	<b>Automotora</b>	0,160	0,023	0,002	-	0,034	0,190	0,408

## ANEXO F - RESULTADOS DA EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 18 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de eutrofização de água doce (g P eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,002	0,026	0,002	-	0,002	-	0,032
	<b>Gasolina</b>	0,002	0,024	0,002	-	0,004	-	0,032
	<b>GPL</b>	0,002	0,022	0,002	-	0,002	-	0,029
	<b>Elétrico</b>	0,002	0,043	0,001	0,035	-	0,017	0,098
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	0,002	0,005	0,005	-	0,003	-	0,015
	<b>Troleicarro</b>	0,002	0,003	0,004	-	-	0,058	0,067
	<b>Elétrico</b>	0,002	0,004	0,005	0,012	-	0,026	0,048
	<b>Gás Natural</b>	0,002	0,005	0,005	-	0,006	-	0,021

Tabela 19 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de eutrofização de água doce (g P eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré-combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,001	0,022	0,002	-	0,002	-	0,027
	<b>Gasolina</b>	0,001	0,020	0,002	-	0,003	-	0,026
	<b>GPL</b>	0,001	0,019	0,002	-	0,002	-	0,024
	<b>Elétrico</b>	0,001	0,037	0,001	0,030	-	0,016	0,086
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	0,001	0,002	0,003	-	0,002	-	0,008
	<b>BRT Diesel</b>	0,002	0,002	0,003	-	0,001	-	0,008
	<b>BRT Elétrico</b>	0,002	0,002	0,003	0,007	-	0,012	0,027
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	0,030	0,001	0,000	-	-	0,011	0,042
	<b>Automotora</b>	0,021	0,008	0,000	-	0,001	-	0,031

## ANEXO G - RESULTADOS DA EUTROFIZAÇÃO MARINHA PARA TODAS AS TECNOLOGIAS

Tabela 20 - Resultados dos veículos urbanos para a categoria de eutrofização marinha (g N eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,009	0,072	0,011	-	0,017	0,003	0,112
	<b>Gasolina</b>	0,009	0,062	0,011	-	0,031	0,001	0,114
	<b>GPL</b>	0,009	0,058	0,011	-	0,012	0,001	0,092
	<b>Elétrico</b>	0,009	0,047	0,010	0,006	-	0,007	0,079
<b>Pesado</b>	<b>Diesel</b>	0,010	0,020	0,023	-	0,025	0,004	0,082
	<b>Troleicarro</b>	0,012	0,013	0,015	-	-	0,026	0,067
	<b>Elétrico</b>	0,010	0,017	0,020	0,002	-	0,012	0,061
	<b>Gás Natural</b>	0,010	0,020	0,023	-	0,023	0,005	0,129

Tabela 21 - Resultados dos veículos suburbanos para a categoria de eutrofização marinha (g N eq/pessoa.km)

		Estrada	Construção veículo	Manutenção veículo	Bateria elétrica	Pré- combustão	Operação	Total
<b>Ligeiro</b>	<b>Diesel</b>	0,008	0,061	0,010	-	0,013	0,003	0,094
	<b>Gasolina</b>	0,008	0,053	0,010	-	0,020	0,001	0,092
	<b>GPL</b>	0,008	0,050	0,010	-	0,008	0,001	0,077
	<b>Elétrico</b>	0,008	0,040	0,008	0,005	-	0,007	0,069
<b>Pesado</b>	<b>Diesel Lousã</b>	0,006	0,010	0,011	-	0,012	0,003	0,042
	<b>BTR Diesel</b>	0,012	0,010	0,011	-	0,011	0,003	0,046
	<b>BTR Elétrico</b>	0,012	0,010	0,012	0,001	-	0,005	0,041
<b>Ferroviário</b>	<b>Tram-train</b>	0,098	0,001	0,002	-	-	0,005	0,106
	<b>Automotora</b>	0,018	0,001	0,000	-	0,011	0,029	0,058

## ANEXO H – CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

Tabela 22 - Características dos combustíveis

<b>Tipo de combustível</b>	<b>Massa específica ( kg/ )</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>Referência</b>
Gasóleo	0,84 /L	42,8	(Jungbluth, 2012)
Gasolina	0,75 /L	42,5	(Jungbluth, 2012)
GPL	0,56 /L	45,7	(TOTAL, 2016)
Gás Natural	0,80 /m <sup>3</sup> (n)	50,3	(Jungbluth, 2012)