



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

# **Comparação energética e ambiental dos modos rodoviário e ferroviário no transporte de mercadorias**

**Nuno Alexandre Rodrigues Pita**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques  
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri:

Presidente:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutora Patrícia de Carvalho Baptista  
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

**Dezembro de 2023**

Página intencionalmente em branco

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

# **Comparação energética e ambiental dos modos rodoviário e ferroviário no transporte de mercadorias**

**Nuno Alexandre Rodrigues Pita**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques  
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Júri:

Presidente:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutora Patrícia de Carvalho Baptista  
Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

**Dezembro de 2023**

Página intencionalmente em branco

## Resumo

O aumento do crescimento económico mundial levou conseqüentemente a um aumento das necessidades das populações que cada vez mais se torna numa sociedade consumista. Este consumo leva ao incremento dos transportes de mercadorias que atualmente, e numa perspetiva de crescimento, são responsáveis pelo uso de uma grande quantidade de energia e a emissão de gases com efeito estufa.

Em termos de transporte terrestre de mercadorias existem dois modos, o rodoviário e o ferroviário, este último que tem vindo a cair em desuso. No entanto o transporte ferroviário apresenta-se como uma alternativa viável para a redução do gasto energético no transporte de mercadorias e na redução de emissões.

Desta forma, o objetivo principal desta dissertação foca-se na quantificação das necessidades energéticas e na quantidade de emissões produzidas no transporte ferroviário e rodoviário, numa variedade de cenários criados. Podendo no final tirar conclusões através da comparação dos dois modos de transporte, verificando até onde estes poderão ser mais eficazes para a diminuição das necessidades energéticas dos transportes de mercadorias. A partir da análise numérica destes resultados conclui-se que pode haver uma diminuição de até três vezes nas necessidades energéticas dos transportes e a emissão de até cinco vezes menos gases poluentes do transporte rodoviário.

Um segundo objetivo deste trabalho é desenvolver um mapa onde está exposto os gastos energéticos e emissões produzidas para se alcançar vários locais do país, Portugal, a partir de um outro para os dois modos de transporte, onde é criada a possibilidade de uma comparação visual das diferenças. A partir destes mapas consegue-se de uma forma mais visual determinar as diferenças entre os dois meios de transporte apresentando a ferrovia em média um uso energético de três vezes inferior e uma produção de emissões de CO<sub>2</sub> cinco vezes menores.

Palavras-Chave: Energia, Emissões, Eficiência, Transporte Ferroviário, Transporte Rodoviário

Página intencionalmente em branco

## **Abstract**

The growth of the world economy as lead to an increase of the population needs, that is more and more close to becoming a consumerist society. This type of behaviour led to an inevitably growth of the transport sector, that nowadays is responsible for consuming and emitting a big chunk of the worlds energy needs and greenhouse gases emissions.

The land freight transport of goods is mainly made by two ways, from railroad or road transport. The use of railroad transport in the last few years has been decaying. However, the rail transport is a good and viable alternative to reduce the energy consumption and the emissions of polluting gases in the freight transport sector.

With the exposed above, the main objective of this thesis is to focus on quantifying the actual energy needs and quantity of emissions generated by both railroad and road transport in a variety of scenarios created. In the end, is expected to be able to reach a conclusion by comparing the two transport modes. Where it will be verified which transport mode is the most energetic efficient and in what scenarios. From a numerical analysis of the results it was possible to conclude that indeed exists an decrease of about three times the total energy consumption and a decrease of about five times the total emissions produced by the road transport.

The second main objective of this thesis is to develop a map where is exposed the energy needs and the total emissions produce to reach various locations in the country, Portugal, from other one specific location. This will be made for the two transport modes, where will be created a more visual possibility for comparing the results of the energy needs and emissions produced by the rail and road freight transport. From the maps is possible to create a more visual way of spotting the difference between the two ways of transport, being in average the energy consumption of railroad three times lower and the production of CO<sub>2</sub> emissions five times lower than the road transport.

Keywords: Energy, Emissions, Efficiency, Rail transport, Road transport

Página intencionalmente em branco

## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores, Professor Nuno Henriques e Professor Gonçalo Duarte que me deram todo o apoio, disponibilidade e orientação que se tornaram imprescindíveis na realização desta dissertação.

A todos os meus colegas com quem compartilhei todos os desafios deste percurso, muitas horas de estudo e trabalho e acima de tudo muita alegria e recordações para levar para o futuro.

Acima de tudo, gostava de agradecer aos meus pais, a minha irmã e familiares por todo o apoio incondicional e conselhos que me deram ao longo deste percurso e da vida que apresentou os seus momentos e desafios mais difíceis.

Página intencionalmente em branco

# Índice

<b>Resumo</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vii
<b>Agradecimentos</b> .....	ix
<b>Índice de Figuras</b> .....	xii
<b>Índice de Tabelas</b> .....	xvi
<b>Siglas e Acrónimos</b> .....	xvii
<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Estrutura do trabalho .....	2
<b>2. Estado da arte</b> .....	4
2.1. Transporte Ferroviário .....	4
2.1.1. Consumo energético .....	4
2.1.2. Estimativa da eficiência energética do transporte ferroviário .....	6
2.1.3. Impactos no consumo energético .....	10
2.1.4. Tecnologias e métodos de transporte para redução de necessidades energéticas .....	19
2.2. Transporte Rodoviário .....	29
2.2.1. Estimativa da eficiência energética do transporte rodoviário .....	29
2.2.2. Impactos no consumo energético .....	32
<b>3. Metodologia</b> .....	41
3.1. Tratamento de dados .....	42
3.2. Casos de estudo a abordar .....	60
3.3. Mapas Energéticos e de Emissões .....	62
3.4. Mapas Energéticos e de Emissões por tonelada transportada .....	66
3.5. Mapas Energéticos e de Emissões .....	66
<b>4. Resultados</b> .....	68
4.1. Caso de estudo I .....	68
4.2. Caso de estudo II .....	71
4.3. Caso de estudo III .....	74
4.4. Caso de estudo IV .....	77
4.5. Mapas Energéticos e de Emissões por tonelada transportada .....	80
4.6. Mapas Energéticos e de Emissões .....	89
<b>5. Conclusões</b> .....	98
<b>6. Referências</b> .....	101

# Índice de Figuras

Figura 1 - Crescimento do transporte rodoviário na europa entre 1995-2019 [6].....	2
Figura 2 - Forças aplicadas numa locomotiva [9].....	4
Figura 3 - Eficiências TTW de locomotivas [11].....	8
Figura 4 - Eficiência WTW de locomotiva elétrica [10] .....	9
Figura 5 - Eficiência WTW de locomotivas [11].....	9
Figura 6 - Impacto do aumento do gradiente longitudinal [15].....	11
Figura 7 - Impacto da curvatura da linha na resistência e velocidade [15] .....	11
Figura 8 - Consumo energético e velocidade no momento de arranque e paragem [15].....	12
Figura 9 - Impacto do peso no consumo energético [15] .....	13
Figura 10 - Impacto da velocidade no tempo de viagem e consumo energético [15].....	13
Figura 11 - Configuração da disposição testadas [19].....	15
Figura 12 - Coeficientes de pressão ao longo de um comboio de 8 carruagens. Dados à direita, medidas laterais retiradas a uma altura $z=2,25m$ , com $y=1,75m$ e $y=3m$ do centro dos carris. Dados à esquerda medidas acima do tejadilho retiradas a uma altura de $z=4,5m$ e $z=5,7m$ do centro dos carris [19] .....	16
Figura 13 - Percurso realizado (Adelaide - Melbourne) e direção dos ventos [19] .....	17
Figura 14 - a) Velocidade registada durante a viagem. b) Coeficiente de pressão registado durante a viagem [19].....	17
Figura 15 - Constituição típica de uma bateria [20] .....	21
Figura 16 - Constituição do DLC [24].....	22
Figura 17 - Representação do sistema LFR [1] .....	25
Figura 18 - Possibilidades do uso do sistema LFR [1] .....	25
Figura 19 - Substituição do Transporte rodoviário pelo LFR [1] .....	26
Figura 20 - Consolidação e desconsolidação da carga [26].....	26
Figura 21 - Conceito do sistema LFR em conjugação com transporte rodoviário [26] .....	27
Figura 22 - Perdas energéticas no transporte rodoviário [30].....	30
Figura 23 - Forças que atuam no veículo [31] .....	31
Figura 24 - Influência da inclinação da estrada [31] .....	32
Figura 25 - Aumento da eficiência com a incorporação de novas tecnologias, ao longo de várias categorias de pesados [5] .....	33
Figura 26 - Evolução da eficiência térmica dos motores em condições de autoestrada em veículos pesados [5] .....	34
Figura 27 - Equipamentos aerodinâmicos para camiões [34].....	35
Figura 28 - Redução do consumo com a instalação de equipamentos aerodinâmicos [30].....	36
Figura 29 - Aumento da eficiência com o uso de pneus largos [30] .....	36
Figura 30 - Pneus duplos vs Pneus largos [35] .....	37
Figura 31 - Consumo do transporte rodoviário com a variação do peso transportado [30] .....	38
Figura 32 - Influência da inclinação do terreno nos consumos do transporte rodoviário [30] ..	39
Figura 33 - Potencial para a redução do consumo no transporte rodoviário de algumas tecnologias [32].....	40
Figura 34 - Procedimento seguido para obtenção de resultados .....	41
Figura 35 - Emissões emitidas por cada MWh de eletricidade produzida em Portugal [64] .....	46
Figura 36 - Emissões emitidas por vários combustíveis durante a sua produção (WTT) e uso (TTW) [68] .....	47
Figura 37 - Estações e Terminais de mercadorias ferroviários em Portugal [73] .....	52

Figura 38 - Troço de rede eletrificada em Portugal [58] .....	53
Figura 39 - Distância entre troços da rede em Portugal [58] .....	54
Figura 40 - Definições utilizadas no google maps [61] .....	55
Figura 41 - Definições utilizadas no via Michelin [60] .....	55
Figura 42 - Peso médio da carga transportada em transporte rodoviário em 2021 (toneladas) [78] .....	56
Figura 43 - Carga máxima permitida por linha [74] .....	57
Figura 44 – Sines – Leixões, esquerda viagem em Ferrovia; direita viagem em Rodovia .....	60
Figura 45 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda troço da Ferrovia; ao meio troço da Rodovia; à direita percurso do transporte Rodoviário entre Lisboa - Bragança, .....	61
Figura 46 – Évora - Loulé, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda, Percurso do transporte rodoviário à direita.....	61
Figura 47 - Sines - Elvas, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda (Por Portalegre) e ao meio (Por Évora), à direita percurso do transporte Rodoviário entre Sines - Elvas .....	62
Figura 48 - População residente em Portugal Continental em 2021 [86].....	67
Figura 49 – Sines – Leixões, esquerda viagem em Ferrovia; direita viagem em Rodovia .....	69
Figura 50 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda troço da Ferrovia; à direita troço da Rodovia .....	72
Figura 51 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Rodoviário.....	72
Figura 52 – Évora - Loulé, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda, Percurso do transporte rodoviário à direita.....	75
Figura 53– Sines - Elvas, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda (Por Portalegre) e ao meio (Por Évora), Percurso do transporte rodoviário à direita .....	78
Figura 54 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	81
Figura 55 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	81
Figura 56 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	82
Figura 57 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo	82
Figura 58 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	83
Figura 59 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	83
Figura 60 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	84
Figura 61 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	84
Figura 62 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	85
Figura 63 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	85
Figura 64 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	86
Figura 65 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	86

Figura 66 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	87
Figura 67 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	87
Figura 68 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	88
Figura 69 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	88
Figura 70 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	90
Figura 71 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	90
Figura 72 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	91
Figura 73 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	91
Figura 74 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	92
Figura 75 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	92
Figura 76 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	93
Figura 77 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	93
Figura 78 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	94
Figura 79 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	94
Figura 80 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	95
Figura 81 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	95
Figura 82 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	96
Figura 83 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	96
Figura 84 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	97
Figura 85 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo.....	97

Página intencionalmente em branco

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Velocidade máxima e coeficiente de pressão médio registados por secção e durante toda a viagem [19] .....	18
Tabela 2 - Poupança nos consumos com otimização dos espaçamentos [18] .....	18
Tabela 3 - Característica de vários géneros de baterias [20] .....	21
Tabela 4 - Poupança no consumo com integração dos SRE, regime suburbano [14] .....	23
Tabela 5 - Poupança no consumo com integração dos SRE, regime regional [14] .....	24
Tabela 6 - Diminuição do consumo e emissões com integração dos SRE [14] .....	24
Tabela 7 - Custos, benefícios e fatores limitadores e de suporte do sistema LFR [1].....	27
Tabela 8 - Classificação energética dos pneus [32].....	30
Tabela 9 - Características técnicas de vagões e locomotivas elétricas [36], [37].....	42
Tabela 10 - Características técnicas de vagões e locomotivas elétricas [38],[39],[40],[41],[42],[43],[43] ,[44],[45],[46],[47],[48],[49],[50] .....	43
Tabela 11 - Consumos para transporte ferroviário, provenientes de referências bibliográficas	44
Tabela 12 - Consumos para transporte rodoviário pesado, provenientes de referências bibliográficas .....	45
Tabela 13 - Consumos acertados para transporte ferroviário, tratamento de dados .....	48
Tabela 14 - Consumos acertados para transporte rodoviário pesado, tratamento de dados....	49
Tabela 15 - Valores representativos dos cenários assumidos para os meios de transporte ferroviário e rodoviário .....	51
Tabela 16 – Exemplo da distância percorrida até destino final em trajeto de ferrovia e rodovia .....	63
Tabela 17 - Consumos de locomotivas diesel e diesel-elétricas .....	64
Tabela 18 - Valores representativos dos cenários assumidos para o meio de transporte ferroviário com locomotivas a diesel e diesel-elétricas .....	64
Tabela 19 - Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo I .....	68
Tabela 20 - Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo I .....	69
Tabela 21- Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo I .....	70
Tabela 22- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo II .....	71
Tabela 23 - Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo II .....	73
Tabela 24- Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo II .....	73
Tabela 25- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo III .....	75
Tabela 26 - Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo III .....	76
Tabela 27- Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo III .....	76
Tabela 28- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo IV .....	78
Tabela 29 - Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo IV .....	79
Tabela 30- Consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo IV .....	79
Tabela 31 – Comparação dos resultados obtidos nos casos de estudo por contentor transportado .....	98
Tabela 32 - Consumo energético médio por tonelada gasto a partir de um ponto de partida ..	99
Tabela 33 – Produção média de emissões por tonelada a partir de um ponto de partida .....	99
Tabela 34 - Consumo energético médio no ano 2021 gasto a partir de um ponto de partida ..	99
Tabela 35 - Produção média de emissões no ano 2021 a partir de um ponto de partida.....	99

## **Siglas e Acrónimos**

UE	União Europeia (UE)
LFR	Light Freight Railway (LFR)
SRE	Sistemas de Recuperação de Energia (SRE)
WTW	Weel-to-wheel (WTW)
WTT	Weel-to-tank (WTT)
TTW	Tank-to-wheel (TTW)
TOFC	Trailer-on-flat-car (TOFC)
COFC	Container on flat car (COFC)
MCI	Motor de Combustão Interna (MCI)
ISO	International Organization for Standardization (ISO)
HEV	Veículos Híbridos Elétricos (HEV)
BEV	Veículos Elétricos (BEV)
EUA	Estados Unidos da América

Página intencionalmente em branco

## 1. Introdução

O transporte de mercadorias transformou-se num dos elementos principais da vida humana, trazendo grandes benefícios para a sociedade e economia. Deste modo o transporte pode ser considerado como um gerador do desenvolvimento económico, um fator da prosperidade da população e uma ferramenta incontestável de relações e trocas interterritoriais [1].

No entanto o transporte também é responsável por perturbações criadas ao meio ambiente, sendo alguns desses fatores a poluição do ar (emissões de NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, PM10 e PM2,5), ruído, acidentes, uso de terrenos e uso intensivo de energia. Os meios de transporte atuais dependem muito de combustíveis fósseis que são uma das principais razões para a degradação do meio ambiente, causando o efeito estufa responsável pela subida média da temperatura do planeta e a degradação da saúde das populações [1].

O desenvolvimento futuro de um transporte de mercadorias sustentável torna-se cada vez mais importante tanto a nível internacional como nacional [1]. Uma drástica redução na emissão dos gases com efeito estufa é necessária para prevenir a subida da temperatura acima de 1,5°C comparado com valores de temperatura registada nos anos de pré-industrialização [2]. Um dos sectores com maior responsabilidade na emissão de poluentes é o setor dos transportes, responsável por 23,2% das emissões totais de contabilizadas na União Europeia (UE) em 2020[3] [4].

De forma a reduzir as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e cumprir os objetivos descritos no acordo de Paris, a UE e os seus estados-membros criaram o acordo europeu “Green Deal”. Este estabelece uma ambição muito clara de atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2050, representando uma redução nas emissões de 90% comparando com os valores do ano de 1990 [4].

Uma das medidas que contribuirá para alcançar os objetivos estabelecidos é uma mudança no uso dos transportes de mercadorias, passando pela transição para o uso de transportes mais sustentáveis não só em termos de quantidades de emissões produzidas, mas também de uso de energia, onde o transporte ferroviário é esperado aumentar a sua atividade em 50% até 2030 e em 100% até 2050 [4].

No entanto é esperado que o transporte rodoviário continue em crescimento na europa, tal como se sucedeu entre 1995 e 2019, como demonstrado na Figura 1. Também nos Estados Unidos da América é projetado que até 2050 o transporte rodoviário tenha um crescimento de 54% nas milhas percorridas por ano [5].

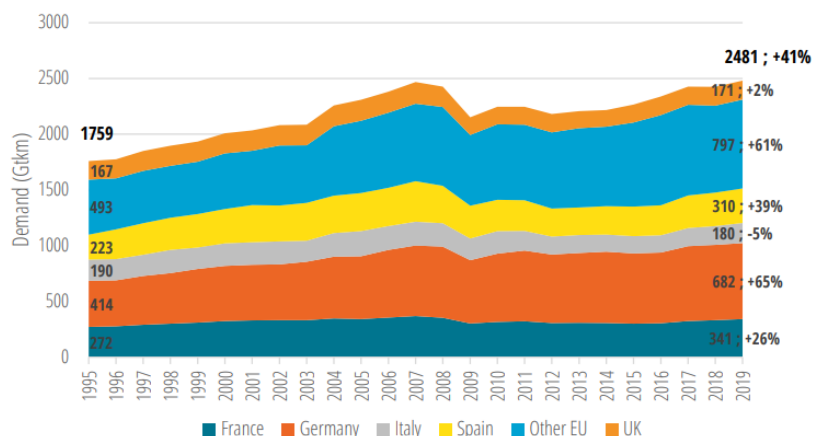


Figura 1 - Crescimento do transporte rodoviário na europa entre 1995-2019 [6]

Com base no exposto acima são traçados uma série de objetivos, cujos irão demonstrar o que se sucede e a realidade do transporte de mercadorias rodoviário e ferroviário no país.

### 1.1. Objetivos

Pretende-se com esta dissertação analisar o consumo de energia e respetiva emissões de CO<sub>2</sub>, associados ao transporte de mercadorias rodoviário e ferroviário em Portugal. Foram analisadas várias combinações origem-destino, tendo em conta a infraestrutura rodoviária e ferroviária existente, de forma a verificar a influência que estes dois pontos têm na utilização de um tipo de transporte em prol do outro. Surgem assim questões a que este trabalho procura dar resposta:

1. Qual dos dois transportes é responsável pela emissão de menos gases com efeito estufa?
2. Compensa uma mudança para uma maior quantidade de transporte efetuado pela ferrovia?

De forma a dar resposta às seguintes questões foi efetuada uma análise numérica que permite apresentar qual poderá ser uma das soluções para o futuro próximo. No sentido de tornar os transportes de mercadoria mais sustentáveis, ou seja, diminuir o consumo energético e a produção de gases com efeito estufa garantindo que não se irá perder a sua competitividade.

### 1.2. Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo é a introdução que se destina a apresentar o ponto atual e uma perspetiva do futuro para os transportes de mercadorias, aparecendo este mais focado nos transportes de mercadorias rodoviário e ferroviário. É neste capítulo que se desenvolve e cria-se a noção, localizando o leitor do estado atual e da importância do

desenvolvimento destes dois meios para aumentar a eficiência do transporte, diminuindo o consumo de energia e ao mesmo tempo a emissões de CO<sub>2</sub>.

O segundo capítulo é o estado da arte onde se aborda temas como os aspetos que influenciam o consumo energético dos veículos, no transporte rodoviário e no ferroviário. A influência de forças exteriores na eficiência dos veículos, responsáveis pelo aumento do consumo de energia, assim como novas tecnologias que possibilitam a diminuição e amenização das influências exteriores e as intrínsecas ao funcionamento dos veículos, como melhorias a nível do motor, pneus e transmissão.

No terceiro capítulo é abordada a metodologia sobre a qual este estudo foi realizado. É neste capítulo que se descreve todo o processo desde o início ao fim de como é desenvolvido o método de cálculo e o processo de pensamento para chegar a resultados. Também é aqui que são analisados e processados todos os dados consultados a partir das referências bibliográficas consultadas.

No quarto capítulo são apresentados todos os resultados obtidos para os casos de estudo abordados e os mapas visuais de consumo energético e produção de CO<sub>2</sub> em todo o país. Neste capítulo são analisados e debatidos os resultados obtidos de forma que haja um começo da criação de algumas ilações de todo o trabalho desenvolvido.

O quinto e último capítulo deste trabalho são realizados e resumidos todos os resultados retirados deste estudo e conclusões finais retiradas. É abordado também o possível trabalho futuro a realizar para melhorar e dar continuação a este estudo.

## 2. Estado da arte

### 2.1. Transporte Ferroviário

#### 2.1.1. Consumo energético

A força motriz do comboio tem de vencer a resistências de aerodinâmica, rolamento, a força de inercia correspondente à aceleração pretendida, e no caso de rampas, tem de se contar com a componente do peso oposta ou a favor do movimento, como ilustrado na Figura 2. Verifica-se ainda um acréscimo de resistência, devido ao atrito do verdugo das rodas contra um dos carris. Esta força é conhecida por resistência de curva, por se verificar sobretudo nas curvas [7].

O consumo energético de uma locomotiva pode ser determinado a partir da potência aplicada às rodas, que por sua vez pode ser calculada através das forças e resistências que atuam no veículo durante o seu movimento [8]. Como referido anteriormente as principais resistências ao movimento da locomotiva são [9]:

- Resistência aerodinâmica;
- Resistência de rolamento;
- Resistência causada pela inclinação e curvas presentes na infraestrutura;
- Energia gasta em equipamentos auxiliares.

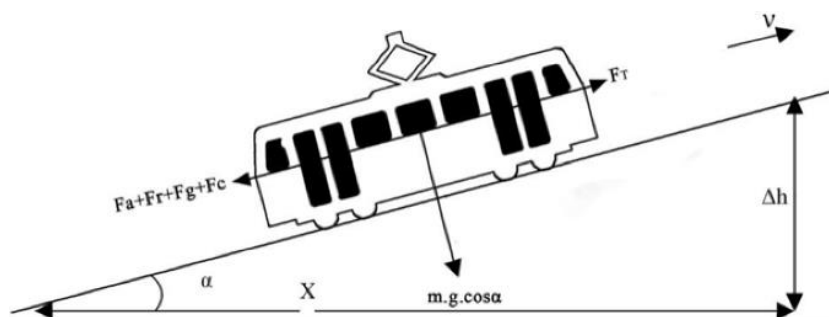


Figura 2 - Forças aplicadas numa locomotiva [9]

A resistência aerodinâmica, é uma força causada pelo movimento do veículo e a interação deste com o ar envolvente, dada pela seguinte equação ((1) [9]:

$$R_a = \frac{1}{2} \times \rho_a \times A_f \times c_d \times v^2 \quad (1)$$

Onde  $R_a$  é a resistência aerodinâmica (N),  $\rho_a$  é a densidade do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A_f$  é a área frontal do veículo ( $\text{m}^2$ ),  $c_d$  é o coeficiente de arrasto do veículo e  $v$  é a velocidade (m/s).

A resistência de rolamento, é uma força causada pelo movimento do veículo e a interação deste com o terreno, dada pela seguinte equação ((2) [9]:

$$R_R = c_r \times m \times g \quad (2)$$

Onde  $R_r$  é a resistência rolamento (N),  $c_r$  é o coeficiente de rolamento,  $m$  a massa do veículo (kg) e  $g$  a aceleração da gravidade ( $m^2/s$ ), segundo a equação ((3) [9].

$$R_g = m \times g \times \text{sen}(\alpha) \quad (3)$$

Onde  $R_g$  é a resistência causada pela inclinação do terreno (N),  $\alpha$  é a inclinação do terreno.

A força total (força de tração) necessária para vencer todas as forças e resistências ao movimento é dada pela seguinte equação ((4), que segue a segunda lei de Newton [9]:

$$F_{trac} = ma + R_a + R_R + R_g + R_i \quad (4)$$

$F_{trac}$  – força de tração [N]

$R_i$  – Resistências ao longo da infraestrutura [N]

A potência instantânea total necessária num determinado momento para vencer as resistências que atuam no veículo é dada pela seguinte equação ((5) [8]:

$$P_{total} = F_{trac} \times v + P_{aux} \quad (5)$$

Na (5)  $P_{total}$  é a potência total consumida pelo veículo num certo momento,  $F_{trac}$  é a força de tração determinada anteriormente,  $v$  a velocidade instantânea do veículo e  $P_{aux}$  a potência dos equipamentos auxiliares. A energia consumida (E [J]) pela locomotiva pode ser calculada a partir da potência consumida ao longo da viagem e do tempo, segundo a equação ((6) [8], [9].

$$E = \int P_{total} (t) dt \quad (6)$$

Os caudais de ventilação dos motores e do ar condicionado das carruagens de passageiros são muito grandes, como tal a resistência de quantidade de movimento, uma oposição ao movimento do comboio, relacionada com a admissão de ar a baixa velocidade e a sua restituição a atmosfera numa direção ortogonal ao movimento do comboio constitui uma percentagem não desprezável da resistência total, nitidamente superior à resistência de rolamento. A resistência de quantidade de movimento é dada pela equação ((7):

$$R_{qm} = \rho Qv \quad (7)$$

Sendo  $Q$  o caudal volúmico de ar ( $m^3/s$ ),  $\rho$  a massa volúmica ( $kg/m^3$ ) do ar e  $v$  a velocidade do comboio (m/s). Esta resistência é característica de comboio longos, porque pode eliminar-se em comboios pequenos [7].

Ao longo dos anos foram criadas e aperfeiçoadas expressões empíricas (dimensionais), usadas para estimar as necessidades de propulsão das locomotivas em determinadas condições, equações (8),(9),(10) e (11). As expressões não contemplam a resistência de rampa, nem a força de inercia devido à aceleração, pois estas são calculadas à parte por não dependerem do material circulante, algumas equações são [7]:

$$R = 2,5 + 0,05 (v/10)^2 \text{ (combois de mercadorias)} \quad (8)$$

$$R = 1 + 0,025 (v/10)^2 \text{ (combois especiais de mercadorias)} \quad (9)$$

$$R = 0,65 G_L + 13N + 0,01G_L v + 0,045 v^2 \text{ (locomotivas)} \quad (10)$$

$$R = 1,38 + 0,0064 v + 0,0002 v^2 \text{ (vagões de mercadorias)} \quad (11)$$

Sendo V a velocidade do comboio (km/h), N número de reboques e  $G_L$  a massa das locomotivas (ton). O coeficiente de resistência aerodinâmico ( $C_D$ ) para contentores é de 6,5 e para mercadoria varia entre 5 a 15. Ambos contam com uma área transversal de 8,8 m<sup>2</sup> [7].

### 2.1.2. Estimativa da eficiência energética do transporte ferroviário

Atualmente a ferrovia pode contar com diversas tecnologias de motorização para as locomotivas, cada variação apresenta as suas vantagens e desvantagens. As principais motorizações utilizadas são as diesel, diesel-elétricas e elétricas. Nos recentes anos têm vindo a surgir locomotivas com recurso a diferentes tecnologias, como a fuel cell que recorre ao hidrogénio para a produção de energia que por sua vez proporciona os motores elétricos do veículo, onde o seu uso é restrito a situações particulares com necessidades de zero emissões no local de uso, como é caso indústria mineira[10].

Na europa existe uma grande parte da rede ferroviária eletrificada, pelo que as locomotivas mais frequentemente utilizadas são as elétricas, já o mesmo não se passa nos Estados Unidos da América (EUA) onde existe apenas uma pequena fração da rede eletrificada pelo que o tipo de locomotivas mais utilizadas serão as diesel e diesel-elétricas [11].

Numa locomotiva elétrica, os principais elementos básicos constituintes do equipamento elétrico separam-se em três grupos [12]:

- Circuito de potência;
- Circuito de controlo;
- Circuitos auxiliares.

## **Circuito de potência**

Os motores de tração constituem o elemento fundamental do circuito de potência. Cabe aos motores de tração, movimentarem a locomotiva, ou seja, assegurar a sua partida e marcha. Eventualmente permitem que se proceda à travagem elétrica [12].

## **Circuito de controlo**

Contém os elementos que permitem o acionamento dos contadores do equipamento de tração a partir da cabina de condução. Cabendo ao circuito de controle assegurar o comando da locomotiva [12].

## **Circuitos auxiliares**

Os circuitos de auxiliares podem ser de baixa tensão ou de alta tensão. Destina-se ao acionamento de funções auxiliares, tais como [12]:

- Ventiladores dos motores de tração;
- Iluminação da locomotiva e cabines;
- Acionamento dos compressores necessários ao travão a ar comprimido;
- Recarregar a bateria e/ou fornecer corrente a baixa tensão;
- Assinalar ótica ou acusticamente defeitos no equipamento e indicar a posição de certos dispositivos;
- Alimentação de grupos de auxiliar de excitação.

Um dos principais métodos para avaliar a eficiência e emissões criados pela circulação de veículos é o método *well-to-wheel* (WTW), que considera o ciclo de vida de um combustível/fonte de energia. Este método é decomposto em duas partes *well-to-tank* (WTT) e *tank-to-wheel* (TTW). O WTT avalia as perdas de energia e emissões criadas por um combustível em toda a cadeia desde a sua fonte até estar pronto a ser utilizado pelo utilizador final, contabilizando com processos como extração, refinação e transporte. Enquanto o TTW avalia as perdas de energia e emissões criadas pelo uso do combustível num veículo [13], [14].

A análise TTW de uma locomotiva segundo (Hoffrichter et al., 2012), mostra que a locomotiva elétrica apresenta uma maior eficiência geral do uso da energia que lhe é fornecida face a outras tipologias de locomotivas, diesel e diesel-elétricas, resultado de os equipamentos utilizados apresentarem maiores eficiências, logo menos perdas desde o tanque/fornecimento de energia até rodas. Já as locomotivas movidas a diesel apresentam menores eficiência gerais, devido maioritariamente às baixa eficiências dos motores de combustão. A Figura 3 demonstra as perdas de eficiências nos vários equipamentos constituintes das locomotivas elétricas e diesel-elétricas.

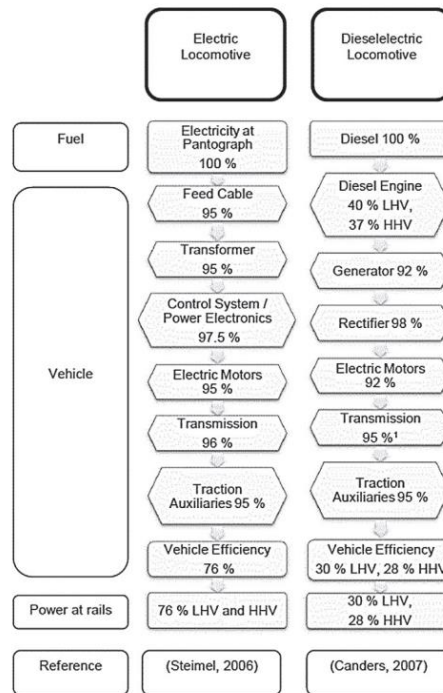


Figura 3 - Eficiências TTW de locomotivas [11]

A análise WTT pode variar bastante conforme o local de produção e métodos de produção de combustível. No caso de locomotivas elétricas a sua eficiência WTW varia consoante o local em que se encontra como mostrado na Figura 5. A produção de energia globalmente difere de país para país, pois os métodos de produção adotados são diferentes e diversificados. A eficiência do mix elétrico é calculado de acordo com a equação ((12):

$$E = \sum (PE \times EP \times TE) \quad (12)$$

*E* – Eficiência do mix elétrico

*PE* – Produção elétrica a partir de um método

*EP* – Eficiência da produção elétrica do método

*TE* – Eficiência do transporte da energia elétrica

A Figura 4 demonstra as perdas totais de energia desde a fonte até ao uso da mesma numa locomotiva elétrica.

Well-to-Tank (Well-to-Pantograph)	LHV Efficiency
Energy at source	100%
Weighted efficiency of North Carolina electricity mix <sup>1</sup>	39.0%
Grid transmission <sup>2</sup>	94%
Catenary transmission <sup>3</sup>	92.5%
<i>Total well-to-tank (well-to-pantograph)</i>	<i>33.9%</i>
Tank-to-Wheel (Pantograph-to-Wheel)	LHV Efficiency
Feed cable <sup>3</sup>	95%
Transformer <sup>3</sup>	95%
Control system and electronics <sup>3</sup>	97.5%
Electric motors <sup>3</sup>	95%
Transmission <sup>3</sup>	96%
Traction auxiliaries <sup>4</sup>	93%
<i>Total tank-to-wheel (pantograph-to-wheel)</i>	<i>74.6%</i>
<b>Total Well-to-Wheel</b>	<b>25.3%</b>

Figura 4 - Eficiência WTW de locomotiva elétrica [10]

A partir da Figura 5 verifica-se que a eficiência WTW das locomotivas elétrica e diesel-elétrica são similares, no entanto as emissões de CO<sub>2</sub> produzidas até a energia chegar às rodas em forma de energia mecânica é cerca de 10 a 15% menor nas locomotivas elétricas. Em casos de países em que as energias renováveis tenham uma forte componente na produção nacional de eletricidade, como o caso do estado da Califórnia, a redução de emissões de CO<sub>2</sub> pode ser significativa.

A incorporação e desenvolvimento das energias renováveis pode levar à inexistência de emissões de CO<sub>2</sub> tanto na produção como no uso da eletricidade e a um melhoramento da eficiência WTW. Na Figura 5 verifica-se que a eficiência WTW da locomotiva elétrica é baixa na parte do WTT (eficiência da produção de eletricidade), acabando por prejudicar a eficiência TTW do veículo.

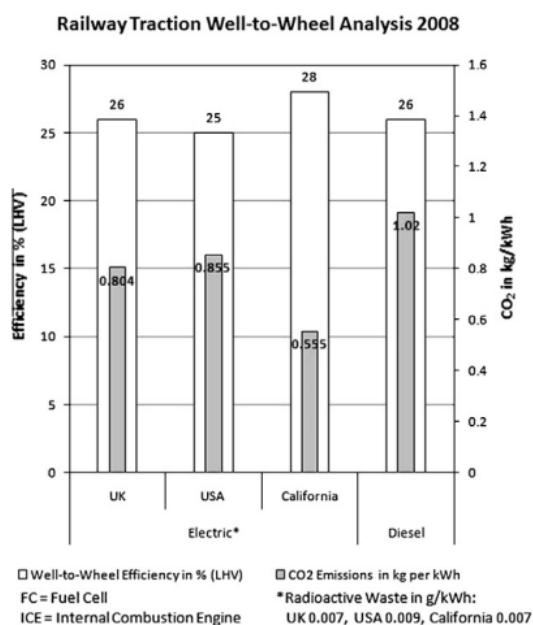


Figura 5 - Eficiência WTW de locomotivas [11]

### 2.1.3. Impactos no consumo energético

A adoção de medidas nas áreas da infraestrutura, controlo de tráfico e dinâmica do veículo, com visão à racionalização do consumo de energia na ferrovia podem apresentar soluções que representam no final de uma viagem uma quantidade percentual significativa de poupança energética.

As infraestruturas da rede ferroviária constituem um dos principais responsáveis, se não o principal, pelos impactos energético associadas ao consumo do transporte ferroviário. O gradiente longitudinal é um exemplo característico que define a infraestrutura (grau de inclinação da linha numa secção) representa uma resistência ao movimento que aumenta gradualmente com o aumento da inclinação. O controlo do tráfico é responsável pela coordenação da movimentação dos comboios, apresentando a capacidade de oferecer a circulação mais eficiente possível dos veículos na linha. A otimização da dinâmica do veículo como velocidade, peso e atitudes do condutor influenciam diretamente os consumos do veículo [15].

#### **Infraestrutura**

Os gradientes longitudinais, as curvaturas das linhas e o contacto entre a roda e os carris são responsáveis pela criação de resistência (atrito) que a locomotiva terá de ultrapassar. A grandeza utilizada para medir a resistência oferecida por um carril é o decanewton por tonelada (daN/t), ou seja, traduz-se numa resistência de 10N por cada tonelada do comboio [15].

É norma das redes ferroviárias limitar a pendente máxima das linhas a cerca de 20% e, normalmente este valor já é considerado excessivo, pelas seguintes razões [7]:

- As potências instaladas nos comboios são pequenas comparadas com a massa deslocada, pelo que não seria possível rebocá-lo ao longo do trainel de forte inclinação;
- O atrito entre a roda e o carril é baixo e limita severamente as forças de tração;
- As forças de tração estão ainda limitadas pelo peso da locomotiva, que não seria viável aumentar para além dos níveis atuais. Esta limitação não se verifica nos sistemas de tração distribuída.

Segundo as simulações efetuadas para uma locomotiva elétrica, com 1200 toneladas a circular a 90 km/h num troço com 20 km de comprimento. A partir da Figura 6 conclui-se que a diferença no consumo é cerca de três vezes superior entre um gradiente de 0 e 25 ‰, enquanto a velocidade máxima atingida num gradiente de 25 ‰ é de 25 km/h [14].

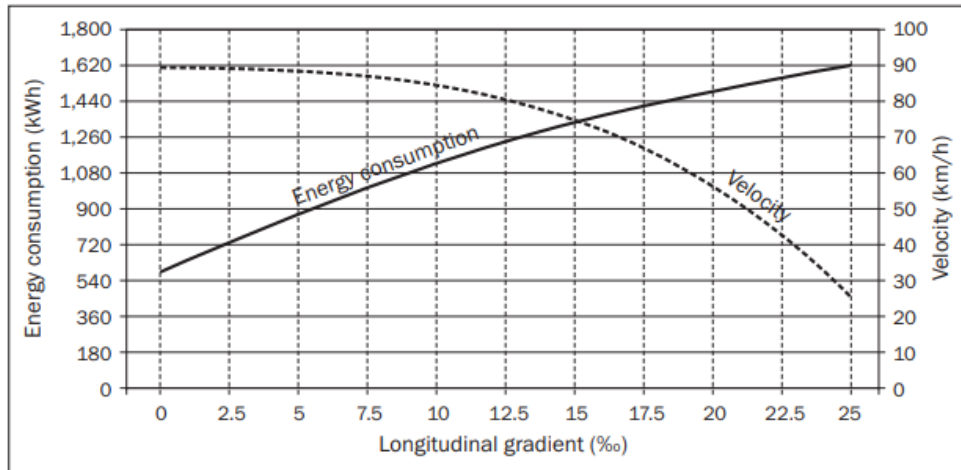


Figura 6 - Impacto do aumento do gradiente longitudinal [15]

Uma mudança de direção na linha adiciona resistência ao movimento, que pode ser determinada a partir do raio de curvatura e do tipo de carril.

$$W_R = \frac{X}{R - Y} \quad (13)$$

$W_R$  – Resistência de curvatura [dN/t]

$X, Y$  – Coeficientes do tipo de carril

$R$  – Raio de curvatura [m]

Para uma simulação semelhante à anterior com um gradiente fixo de 12 ‰, o resultado obtido para a resistência de curvatura para diferentes raios é apresentado na Figura 7. Caso o comboio seja demasiado comprido este poderá estar em mais de uma curva ao mesmo tempo, o que aumentará a resistência [15].

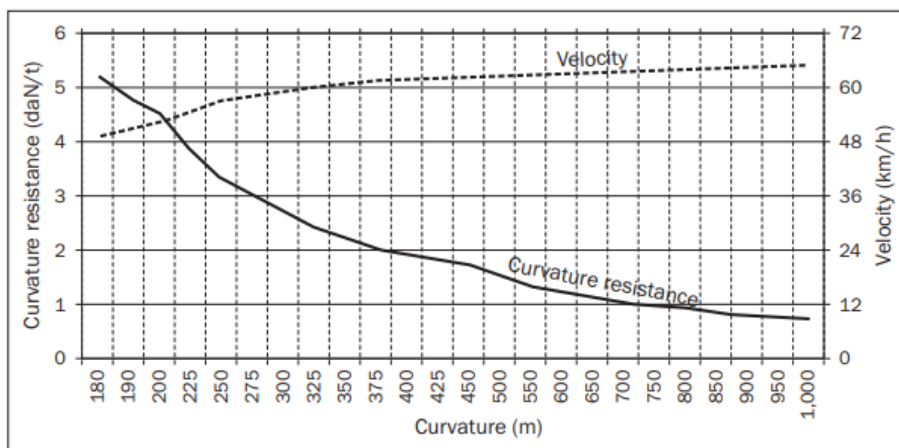


Figura 7 - Impacto da curvatura da linha na resistência e velocidade [15]

## Controlo do tráfego

O controlo do tráfego na rede ferroviária apresenta um importante papel no consumo energético dos veículos ferroviários. Ações como paragens inesperadas e desnecessárias pela falta de coordenação dos veículos na rede pode levar, por exemplo, que um comboio de mercadorias com 1200 toneladas consuma cerca de 10% mais energia [15].

Acelerações e travagens são um dos pontos durante uma viagem em que existe um maior consumo e desperdício de energia, Figura 8. Uma das formas de minimizar o consumo e otimizar a eficiência dos veículos nas ferrovias sem realizar alterações ao veículo, passa pela otimização e controlo do tráfego, evitando ao máximo paragens durante todo o percurso. As linhas de duas vias mostram-se mais eficientes quando equiparadas com as linhas de via única, por permitirem evitar o cruzamento de comboios e a continua circulação em sequência do mesmo [15].

Outro fator que influencia o consumo é a manutenção da velocidade quando se encontra em terreno ascendente. Como visto anteriormente a inclinação do terreno e a velocidade a que o veículo circula tem um impacto significativo no consumo, por essa razão a desaceleração durante uma subida pode contribuir para o aumento da eficiência do veículo [15].

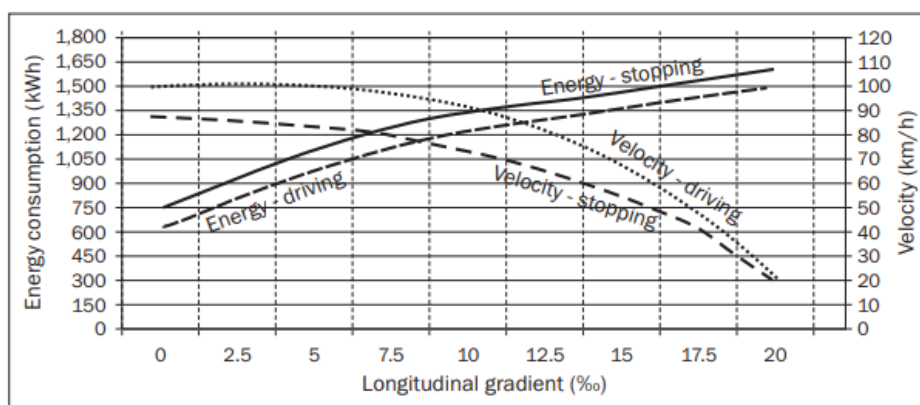


Figura 8 - Consumo energético e velocidade no momento de arranque e paragem [15]

## Dinâmica do veículo

A dinâmica do veículo resume-se aos limites físicos que caracterizam uma locomotiva como a velocidade máxima de circulação, o peso máximo de transporte, a capacidade de aceleração e a aerodinâmica do veículo.

### Peso

No transporte de mercadorias um dos aspetos mais importantes é o peso máximo possível de ser carregado no veículo, pois esse valor irá depender de leis (peso máximo permitido para circulação), regras de segurança (peso por eixo) e limitações físicas do veículo (capacidade máxima rebocável).

Atualmente 3600 toneladas é o peso máximo admitido na Europa para composições ferroviárias, porque esse limite corresponde ao limite de resistência dos engates não-automáticos suscetíveis de serem manobrados por uma só pessoa. Na América do Norte são utilizados engates automáticos que permitem composições com um peso superior e comprimentos com mais de uma dezena de quilômetros. Uma força de tração ou compressão longitudinal nos engates que seja 10% do peso de uma composição tão grande representa cerca de 18 vezes o peso próprio de uma carruagem de 40 toneladas, e, portanto, pode comprometer a estabilidade, sobretudo em curva [7].

Testes mostram que a resistência mecânica a uma velocidade constante varia com a quantidade de carga transportada, ou seja, a quantidade de mercadoria transportada numa carruagem influencia diretamente a resistência mecânica ao movimento oferecida. A resistência de uma carruagem totalmente carregada quando comparada com uma sem carga pode ser até 50% superior [16].

De forma a verificar-se o impacto do peso transportado do veículo e o tempo de viagem correspondente, para um gradiente fixo de 8 ‰ e uma distância percorrida de 20 km, (Mlinarić; Ponikvar, 2011) obteve os resultados apresentados na Figura 9 e Figura 10.

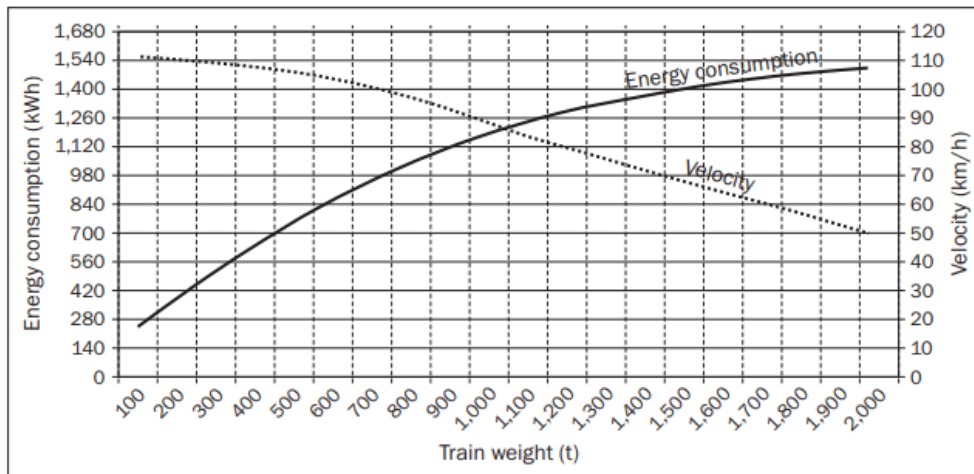


Figura 9 - Impacto do peso no consumo energético [15]

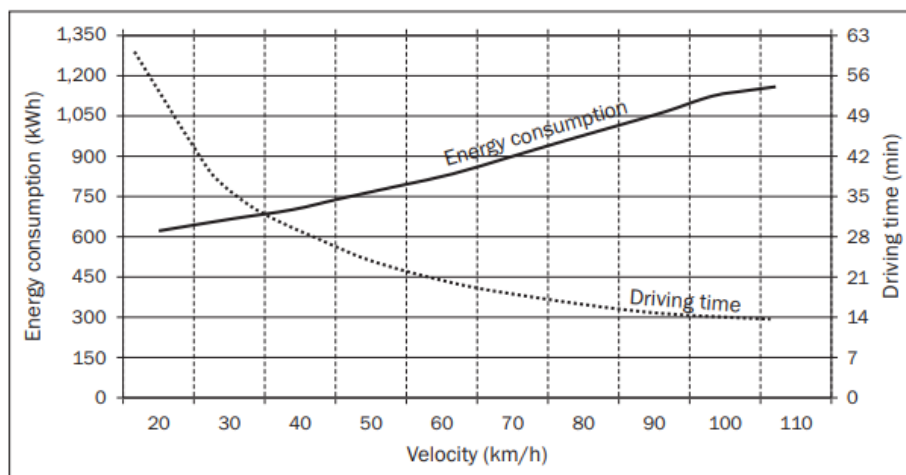


Figura 10 - Impacto da velocidade no tempo de viagem e consumo energético [15]

A partir da análise da Figura 9 nota-se que o peso ideal a transportar é de 1100 toneladas, pois este permite o melhor equilíbrio entre carga transportada e velocidade de circulação, que se traduz em tempo decorrido. No entanto é de notar que em termos de custos, limitações da infraestrutura e veículo poderá compensar o maior ou menor transporte de carga.

### **Aerodinâmica**

O carregamento da mercadoria num comboio é feito consoante a distribuição da massa, peso sobre o eixo e eficiência da alocação de espaços ao longo do comprimento do comboio[17]. No entanto muitas vezes, não é tido em conta a aerodinâmica do veículo. A diminuição do espaçamento entre contentores pode causar uma diminuição considerável do coeficiente de arrasto de até 25%. O coeficiente de arrasto é um dos principais fatores que afetam o consumo, este por sua vez aumenta com a velocidade. Dois comboios podem apresentar diferentes disposições para a alocação de contentores semelhantes, no entanto podem apresentar eficiências energéticas bastante diferentes e resistências aerodinâmicas conseqüentemente. Este facto deve-se, apenas á forma de como é realizada a distribuição e disposição da carga [18].

A circulação de ar em torno de um veículo em movimento é denominada de *slipstream*, está é caracterizada por uma região turbulenta de ar não estacionário. Estudos mostram que é possível dividir o *splistream* de um comboio em quatro regiões distintas [19]:

- Região frente do comboio, caracterizado pelo pico da velocidade do ar envolvente;
- Região da camada limite, caracterizada pelo crescimento da camada limite ao longo do comboio;
- Região traseira do comboio, caracterizada por uma elevada turbulência com separação de camadas ou criação de vórtices;
- Região Tardia (depois da passagem do comboio), caracterizada pelo decaimento da velocidade no *splistream*.

Verificou-se experimentalmente o comportamento do *slipstream*, e conseqüentemente o coeficiente de pressão, e a influência que a disposição dos contentores ao longo do comboio teriam no mesmo. Foram testadas três disposições, o *consist 1*, o *consist 2* e o *consist 3* como mostrado na Figura 11, respetivamente cada um corresponde a 100%, 50% e 33% da capacidade de carga total [18].

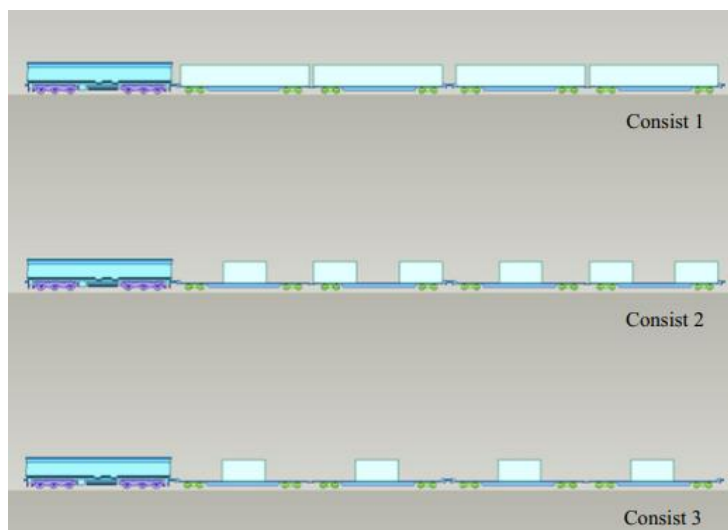


Figura 11 - Configuração da disposição testadas [19]

O coeficiente de pressão,  $C_p(x)$ , avaliado na experiência realizada ao longo do comboio é dado pela seguinte equação ((14) [19]:

$$C_p(x) = \frac{p(x) - p_0}{0.5 \times \rho \times V_{locomotiva}^2} \quad (14)$$

$p(x)$  – Pressão medida num ponto [Pa]

$p_0$  – Pressão ambiente [Pa]

$\rho$  – densidade do ar [ $kg/m^3$ ]

$V_{locomotiva}^2$  – velocidade da locomotiva [ $m/s$ ]

A partir dos resultados obtidos experimentalmente, mostrados na Figura 12, é possível observar a evolução do coeficiente de pressão ao longo do comboio, identificando-se as regiões acima referidas nas três experiências realizadas. A primeira perturbação verificada no ponto 0 m e onde é registado a maior resistência ao movimento corresponde á frente do comboio, este ponto irá variar consoante a forma da frente da locomotiva. Entre os 20 m e os 180 m de distância da frente do comboio, uma segunda região é averiguada, onde é visível a influência dos espaçamentos entres os contentores. No *consist 1* é observável menores perturbações ao longo do comboio, devido à existência de menor espaçamento entre contentores, ao contrário do que acontece com o *consist 2* e o *consist 3*. Após a passagem de um contentor um pico negativo é criado devido a uma depressão do ar envolvente e à chegada do próximo contentor um pico positivo é criado devido ao aumento de pressão resultante da movimentação do contentor. Este fenómeno é visivelmente mais bem identificado nos *consist 2* e *consist 3*, com o maior espaçamento dos contentores entre eles. A terceira região é identificada na passagem do último contentor no final do comboio, onde há um pico negativo, tal como acontece com a frente do comboio este pico variará consoante a forma da traseira do comboio. A região final é

observada depois do último pico negativo, em que o ar envolvente tende a criar sucessivas ondas de choque até se restabelecer a pressão ambiente [18][19].

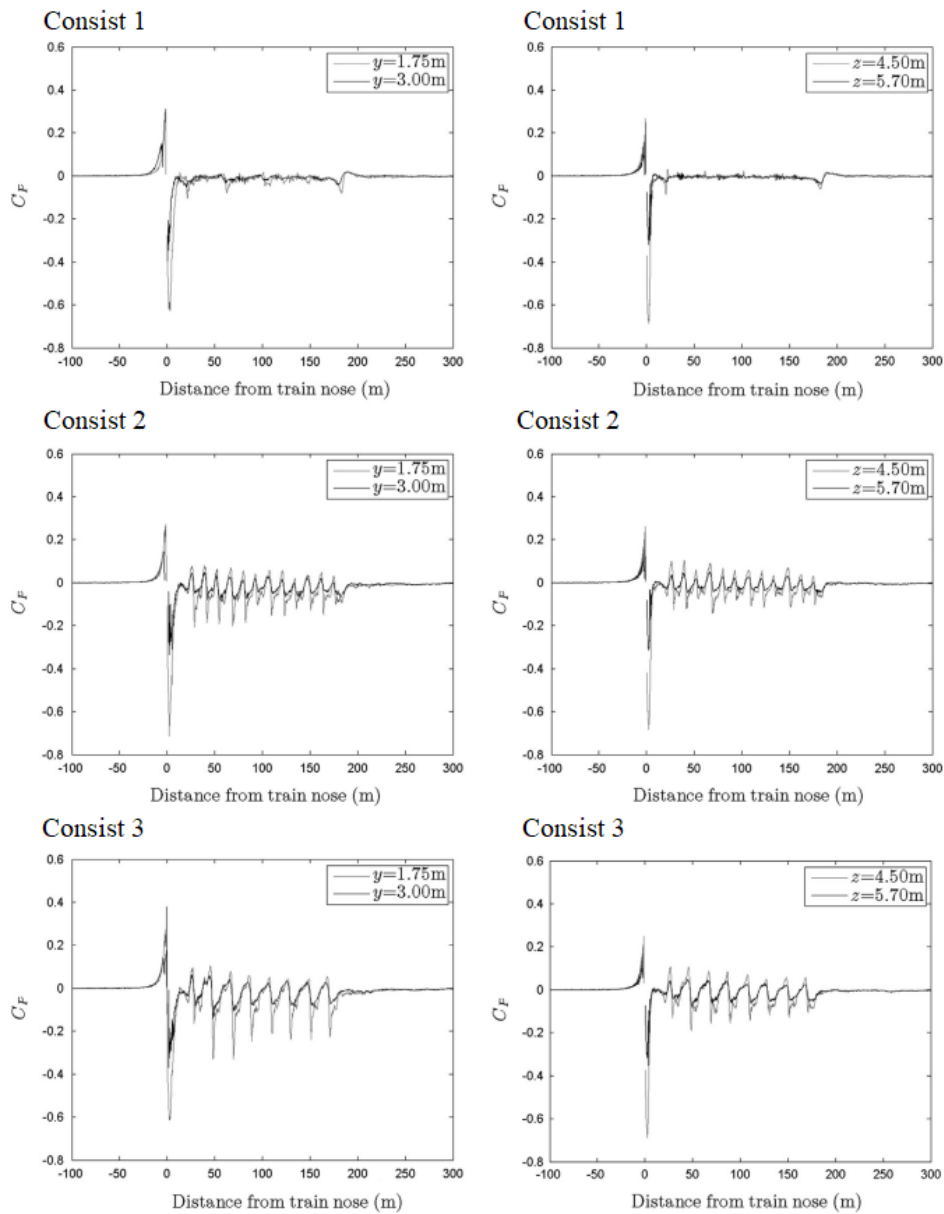


Figura 12 - Coeficientes de pressão ao longo de um comboio de 8 carruagens. Dados à direita, medidas laterais retiradas a uma altura  $z=2,25\text{m}$ , com  $y=1,75\text{m}$  e  $y=3\text{m}$  do centro dos carris. Dados à esquerda medidas acima do tejadilho retiradas a uma altura de  $z=4,5\text{m}$  e  $z=5,7\text{m}$  do centro dos carris [19]

Num estudo realizado á escala real, foi avaliado o efeito da velocidade e dos ventos cruzados na resistência aerodinâmica de um contentor isolado durante uma viagem, Figura 13 [16].

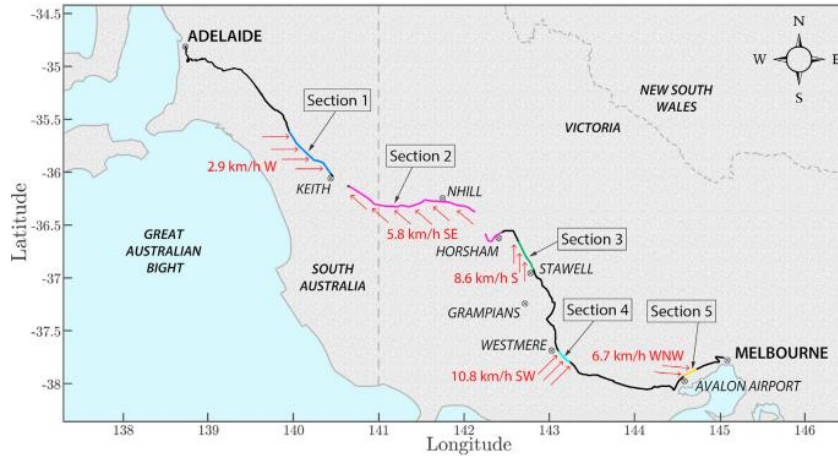


Figura 13 - Percurso realizado (Adelaide - Melbourne) e direção dos ventos [19]

A partir de dados retirado nas respetivas secções da ferrovia chegou-se à conclusão de que a resistência aerodinâmica média durante toda a viagem foi de 0,48. A Figura 14 mostra os resultados obtido ao longo da viagem, registando-se nas secções 1,2 e 3 valores constantes consoante a variação da velocidade e a influência dos ventos cruzados. Na secção 4 regista-se valores elevados da resistência aerodinâmica, em relação as secções 1,2 e 3, embora a velocidade se tenha mantido semelhante às das secções 1 e 3, este aumento sugere a presença significativa de fortes ventos cruzados. Já na secção 5 é verificado uma diminuição da resistência aerodinâmica devido há presença de ventos provenientes na direção da traseira do comboio [17].

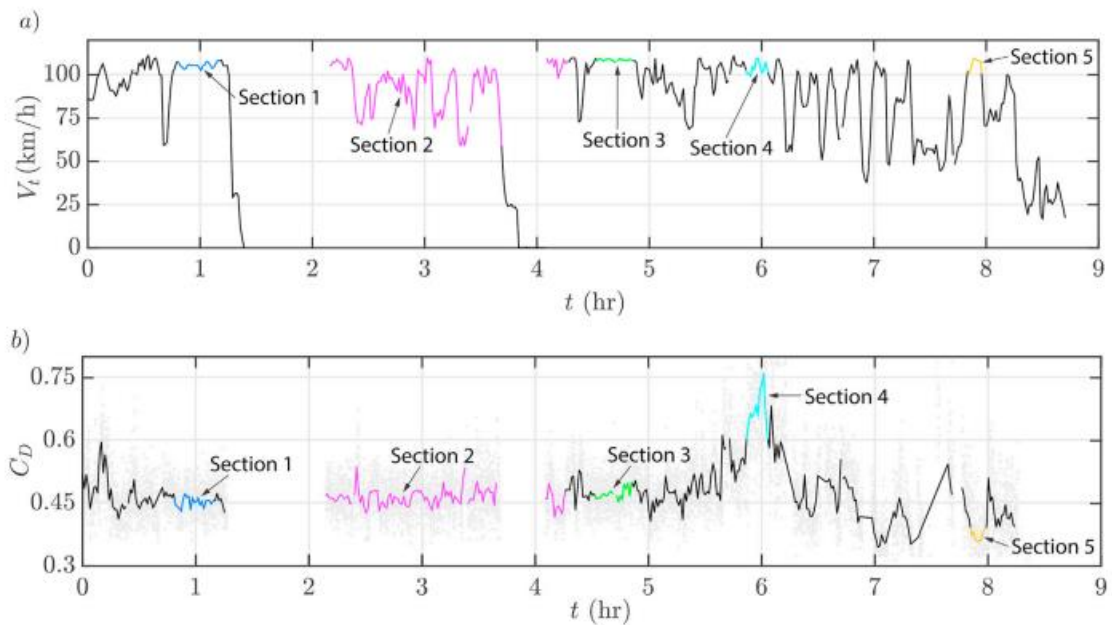


Figura 14 - a) Velocidade registada durante a viagem. b) Coeficiente de pressão registado durante a viagem [19]

A Tabela 1 apresenta os valores médios da velocidade e da resistência aerodinâmica registados ao longo de toda a viagem e em cada secção. A partir da tabela é perceptível a influência dos ventos cruzados e a sua direção, particularmente na secção 2,4 e 5, com a presença de uma velocidade praticamente constante [17].

Tabela 1 - Velocidade máxima e coeficiente de pressão médio registados por secção e durante toda a viagem [19]

Track Section	$V_T$ (km/h)	$C_D$
Entire Trip	96	0.48
1	104	0.45
2	85	0.45
3	110	0.47
4	103	0.70
5	103	0.37

De forma a estimar as potencialidades para a diminuição do consumo energético das locomotivas, otimizando o espaçamento entre os contentores num comboio. Foram testados dois tipos distintos de comboios, o *train 3* que é um comboio que transporta atrelados, *trailer-on-flat-car* (TOFC) ou *container-on-flat-car* (COFC), e o *train 4* que é um comboio que transporta contentores de diversos tamanhos. Para avaliar as poupanças foram criados 3 cenários distintos [18]:

1. O número de contentores existente para transporte é igual à capacidade de transporte do comboio;
2. O número de contentores existente para transporte é superior à capacidade de transporte do comboio;
3. O número de contentores existente para transporte é inferior à capacidade de transporte do comboio.

Com a criação destes cenários chega-se à possível poupança, com a redução dos espaçamentos ao máximo quando comparado com algumas das regras de carregamento da carga referidas acima. A Tabela 2 mostra as potenciais estimativas de poupança de combustível (energia) usado numa viagem, mostrando que o *train 3* é o que apresenta maior potencialidade para poupar mais combustível, face ao *train 4* devido à possibilidade de se poder aproximar mais a carga [18].

Tabela 2 - Poupança nos consumos com otimização dos espaçamentos [18]

Train	Fuel consumption (gallons)		Fuel savings	
	Optimal	Terminal	(gallons/mile)	%
(1)				
3	937	996	0.59	5.9
4	944	986	0.42	4.3
(2)				
3	937	1033	0.96	9.3
4	945	967	0.22	2.3
(3)				
3	823	926	1.03	11.1
4	838	928	0.90	9.7

A circulação dos comboios em túneis afeta a resistência aerodinâmica do comboio, sendo esta superior à de um comboio a circular num espaço aberto. O espaçamento entre o comboio e as paredes do túnel são muito pequenas, o que causa o aumento da resistência do ar. O aumento da resistência do ar poderá ser quase duas vezes superior em comparação com a circulação em espaços abertos [16].

#### 2.1.4. Tecnologias e métodos de transporte para redução de necessidades energéticas

##### **Sistemas de Recuperação de Energia (SRE)**

Os Sistemas de Recuperação de Energia (SRE) ao longo das últimas décadas têm vindo a ser desenvolvidos. As tecnologias utilizadas têm-se tornado energeticamente mais eficientes e financeiramente mais acessíveis, possibilitando o aumento da eficiência e consumo energético dos transportes [20].

Os SRE têm como função recuperar e reutilizar energia proveniente das travagens, podendo ser utilizada no auxílio de energia aos motores ou alimentar aparelhos auxiliares [20]. Energia que é dissipada em forma de calor através de desaceleradores hidrodinâmicos, travões mecânicos ou resistores elétricos [21]. SRE na ferrovia ganha uma grande importância, pois devido ao peso e velocidades praticadas por comboios de transporte de mercadorias, estes apresentam uma grande quantidade de energia contida durante as travagens e acelerações. É em cenários onde existem declives nas rotas que se poderá tirar maior proveito dos SRE instalados em locomotivas elétricas e a diesel [22].

Os sistemas de recuperação de energia existentes para serem utilizados na ferrovia são [20]–[22]:

- Sistema *flywheel*;
- Sistema de baterias;
- Sistema hidrostáticos;
- Sistema de condensadores de dupla camada (*double-layer capacitor*).

##### **Sistema *flywheel***

Os sistemas do tipo *flywheel* são sistemas do tipo eletromecânico que armazenam energia, proveniente de uma fonte, na forma de energia cinética. A energia cinética é criada através da aceleração de um rotor, com uma determinada massa, a altas velocidades, por norma entre as 25000 – 30000 rotações por minuto. A quantidade de energia total armazenada é dada pela equação ((15) [20], [21]:

$$E_f = \frac{1}{2} J_f \omega_f^2 \quad (15)$$

$E_f$  – energia cinética rotacional armazenada [J]

$J_f$  – momento de inércia do flywheel [ $kg.m^2$ ]

$w_f$  – velocidade angular do flywheel [ $rad/s$ ] [22]

Através da desaceleração do rotor, que se encontra ligado a um gerador elétrico é possível transformar a energia cinética em energia elétrica, que posteriormente poderá ser utilizada [21]. De notar que o rotor necessita de manter uma velocidade mínima, o que torna impossível de utilizar toda a energia cinética contida no mesmo. A energia cinética total convertida em energia elétrica é dada pela equação ((16) [20]:

$$E_u = \frac{1}{2}J_f(w_{m\acute{a}x}^2 - w_{min}^2) \quad (16)$$

$E_u$  – energia cinética rotacional convertida [ $J$ ]

$w_{m\acute{a}x}$  – velocidade angular antes da desaceleração [ $rad/s$ ]

$w_{min}$  – velocidade angular depois da desaceleração [ $rad/s$ ]

De forma que o rendimento deste sistema fosse melhorado, através da redução das perdas por atrito entre rotor, rolamentos e o ar, a câmara onde o rotor se encontra pode ser sujeita a vácuo ou composta por um gás inerte para diminuir a resistência do ar sobre o rotor [20], [22]. Os rolamentos utilizados podem ser magnéticos permitindo que o eixo do rotor levite e gire sem a existência de contacto com os rolamentos, eliminando o atrito [23].

O rendimento dos sistemas com as tecnologias acima referidas implementadas, podem ser superiores a 95%. Os rotores dos flywheels atualmente são feitos á base de compósitos de fibra de carbono, fibra de vidro e kevlar, pois permitem obter maiores velocidades e maiores tensões de corte que o aço. A capacidade de potência armazenada no sistema relaciona-se diretamente com os limites de tensão de corte e as características do motor, de acordo com a equação ((17) [20], [22].

$$P_f = T_f w_f \quad (17)$$

$P_f$  – potência armazenada [ $W$ ]

$T_f$  – torque produzido no motor [ $Nm$ ]

### **Sistema de baterias**

Os sistemas de baterias utilizados nos SRE permitem armazenar uma elevada densidade de energia, armazenando altos valores de energia desenvolvida na travagem. Uma das vantagens do uso das baterias é o elevado potencial de armazenamento de toda a energia consoante o tamanho das mesmas [20].

As baterias apresentam duas aplicações gerais, uso em alta potência ou uso de elevada densidade de energia. As baterias de elevada potência são utilizadas por norma quando

existe a necessidade de alimentar motores elétricos para tração de veículos pesados de mercadorias (por exemplo locomotivas com tração elétrica), enquanto as baterias para uso como uma fonte de energia (elevada densidade energética) são maioritariamente utilizadas em situações onde se procura obter uma maior autonomia (por exemplo veículos elétricos) [21]. O uso destas duas hipóteses é verificável no caso dos veículos elétricos atuais, onde é necessário existir uma conciliação dos dois, ou seja, elevado fornecimento de potência aos motores significa um aumento do desempenho do veículo (aceleração, etc.), mas uma diminuição da sua autonomia (distância percorrida numa única carga). No entanto uma elevada disponibilidade de densidade energética leva a um aumento da autonomia e a respetiva diminuição do desempenho do veículo.

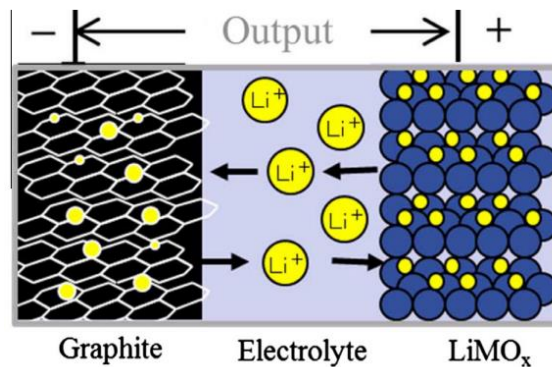


Figura 15 - Constituição típica de uma bateria [20]

Atualmente a tecnologia das baterias é baseada na reação química entre dois eletrodos e um eletrólito, Figura 15, atualmente uma solução de base em lítio ou níquel. Este tipo de baterias é o mais utilizado por oferecer bons valores de densidade energética, tempo de descarga e custo. As baterias de lítio oferecem uma maior eficiência e densidade energética (75 – 200 Wh/kg) que o níquel (30 – 80 Wh/kg). Já as baterias de níquel oferecem melhores prestações em condições de temperatura extremas e boa resistência a descarga fundas [20].

Tabela 3 - Característica de vários géneros de baterias [20]

	NCA LiNiCoAlO <sub>2</sub>	SLFP LiFePO <sub>4</sub>	NMC LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LTO Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>
Cell voltage, 100%/50% SOC	4.0 V/3.6 V	3.8 V/3.3 V	4.2 V/3.7 V	2.8 V/2.4 V
Energy	+++	++	+++	–
Power	+++	++	++	+
Calendar life	+++	++	+	–
Cycle life	++	++	++	+++
Safety	+	+++	+	+++
Cost	+	+	++	–

Uma das grandes desvantagens das baterias é o ritmo ao qual conseguem ser carregadas, o que pode levar a que não aceitem toda a energia proveniente do SRE e haja a necessidade de dissipar essa energia. Outra desvantagem é o ciclo de vida das baterias que comparado com outras tecnologias apresentadas é relativamente curto, 1000 a 10000 ciclos [20]. Com o aumento da temperatura e desgaste estes acontecimentos tem a

tendência para causar a diminuição do rendimento das baterias, que por sua vez provoca a menor aceitação de energia.

### Sistema hidrostáticos

O sistema hidrostático é ao contrário dos restantes SRE é um sistema totalmente mecânico, não sendo necessário a existência de um motor ou gerador elétrico. Esta tecnologia funciona com base na manutenção da pressão de um fluido incompressível, por parte de um outro fluido compressível. Este último irá ser o responsável pela recuperação da energia cinética proveniente da travagem [20].

As principais vantagens da aplicação do sistema hidrostático à ferrovia são a duração de vida do sistema que é a mesma do veículo, fácil manutenção (inspeção visual de 10 em 10 anos) e a velocidade de carregamento e descarregamento do sistema [20].

### Sistema de Condensadores de dupla camada (*double-layer capacitor*)

Os sistemas de condensadores de dupla camada (DLC) é um sistema de SRE, cuja base de funcionamento é a mesma dos condensadores eletrolíticos [20]. O DLC é formado por três componentes, Figura 16, um líquido orgânico que irá funcionar como eletrólito, duas placas metálicas polarizadas, uma positiva e outra negativa, que funciona como elétrodo e um material constituído por carbono poroso que permite aumentar a área de superfície de ligação aos elétrodos [24].

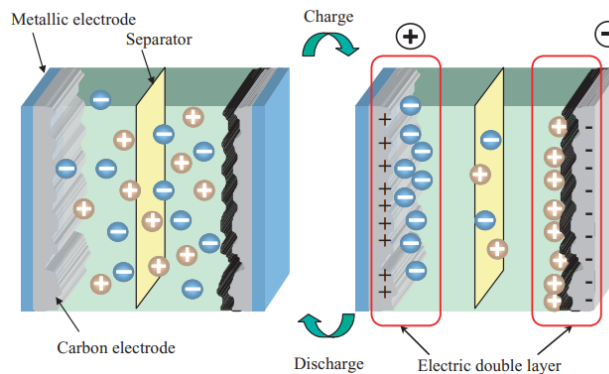


Figura 16 - Constituição do DLC [24]

A aplicação de uma tensão no DLC, causa a deslocação de elétrodos para os polos de sinal oposto (placas metálicas). Caso a tensão aplicada aos polos seja inferior à tensão de ativação do eletrólito, não existe reação [24]. A capacidade de armazenamento deste tipo de aparelho depende do tamanho e material das placas metálicas, já a transferência de energia entre as placas é dependente das características físicas do líquido [20]. A quantidade máxima de energia possível de armazenar num DLC é dada pela equação ((18) [20]):

$$E_{DLC} = \frac{1}{2} CU_{máx}^2 \quad (18)$$

$E_{DLC}$  – capacidade de armazenamento de energia do DLC [Wh/J]

$C$  – capacitância [F]

$U$  – tensão [V]

Um sistema DLC encontra-se limitado pela quantidade de energia máxima que realmente pode utilizar, devido a razões de durabilidade e fiabilidade dos sistemas. Embora ao contrário das baterias os DLC suportam melhor os ciclos de descarga totais, no entanto não é pelas razões anteriormente apresentadas que se pode contar com a totalidade da energia presente do aparelho. Assim a capacidade total de armazenamento de energia dos DLC passa a ser dado pela equação ((19) [20], [25]):

$$E_{DLC} = \frac{1}{2}CU_{uso\_m\acute{a}x}^2 - \frac{1}{2}CU_{uso\_min}^2 \quad (19)$$

A potência produzida no DLC é dada pela equação ((20) [20], [25]):

$$P_{DLC} = UI \quad (20)$$

$P_{DLC}$  – potência produzida pelo DLC [W]

$I$  – corrente no DLC [A]

### Possibilidade de poupança de energia com os SRE

Através de estudos da aplicação dos sistemas de recuperação e armazenamento de energia proveniente da travagem, verifica-se que a integração destes sistemas pode levar a poupanças energéticas significativas do consumo nas locomotivas. Segundo um estudo em regime suburbano e regional, Tabela 4 e Tabela 5 e a Tabela 6, a integração dos SRE pode levar às seguintes poupanças consoante o tipo de locomotiva estudada [14].

Tabela 4 - Poupança no consumo com integração dos SRE, regime suburbano [14]

Vehicle	Generic3-car DMU		
	Diesel-hydrmechanic (4-speed automatic transmission)	Diesel-hydrmechanic (6-speed automatic transmission)	Diesel-electric
Standard vehicle	145.8 l (c)	126.5 l (b)	132.2 l (b)
Hybrid with DLC	123.3 l (a)	114.3 l (a)	122.2 l (a)
Hybrid with ESS	110.7 l (a)	111.2 l (b)	111.8 l (a)
Hybrid with flywheel ESS	113.2 l (a)	110.6 l (b)	103.6 l (a)
Hybrid with battery ESS			

Tabela 5 - Poupança no consumo com integração dos SRE, regime regional [14]

Vehicle	Generic3-car DMU		
	Diesel-hydrmechanic (4-speed automatic transmission)	Diesel-hydrmechanic (6-speed automatic transmission)	Diesel-electric
Standard vehicle	218.5 l (a)	198.7 l (b)	209.7 l (a)
Hybrid with DLC ESS	193.1 l (a)	182.6 l (b)	195.3 l (b)
Hybrid with flywheel ESS	177.3 l (a)	178.6 l (b)	184.4 l (b)
Hybrid with battery ESS	180.7 l (a)	177.1 l (b)	170.9 l (a)

Tabela 6 - Diminuição do consumo e emissões com integração dos SRE [14]

Parameter	Units	Diesel	Diesel-flywheel	Diesel-Battery
Fuel	L	7015.16	6145.44	5566.61
NOx(corr)	kg	422.98	372.59	337.95
PM	kg	18.30	16.49	14.81
HC	kg	10.61	9.26	8.39
CO	kg	96.74	83.48	75.02

A desaceleração de um comboio em rampa até a estação e a aceleração em rampa a partir da estação é o meio mais eficiente de conservar a energia mecânica. Para se conseguir uma recuperação de 100%, isto é, para não aplicar os travões na subida, considerando as resistências ao avanço, a estação deveria estar a uma altura igual ou superior a segundo a equação ((21) [7]:

$$\Delta z_{min} = \frac{v^2}{2g} - \frac{RL}{Mg} \quad (21)$$

Em que  $v$  representa a velocidade (m/s),  $g$  o modulo de aceleração gravítica ( $m/s^2$ ),  $R$  representa a resistência média ao longo do comprimento de desaceleração (N/m),  $L$  (m), e  $M$  a massa do comboio (kg). A primeira parcela da equação acima representa o desnível necessário se não se considerasse resistências [7].

### Light Freight Railway (LFR)

A União Europeia (UE) tem vindo a criar um conjunto de medidas para reativar o transporte ferroviário, com o objetivo de incentivar a mudança do transporte rodoviário para o ferroviário. Como consequência desta mudança poderá verificar-se a redução do tráfego rodoviário, redução de emissões poluentes e aumento da segurança no transporte (redução de acidentes rodoviários) [1].

O documento escrito em 2011 pela UE o White Paper indica como um dos objetivos a redução em 30 % do transporte rodoviário responsável por transportes de mercadorias com distâncias superiores a 300 km para outro modo de transporte como o ferroviário e marítimo até 2030, e uma redução de 50% até 2050. Este objetivo acaba por incentivar o transporte multimodal, passando o transporte rodoviário a ter funções de conexão entre as estações/portos e os locais de entrega e vice-versa [1].

No atual mercado do transporte rodoviário, este é visto como o responsável pelo transporte de grandes volumes de mercadoria em viagens de longa distância. No entanto

o transporte ferroviário pode ser a solução para as políticas de transporte e sustentabilidade da UE, implementando o modelo designado por Light Freight Railway (LFR) [1].

O conceito do sistema LFR será a implementação do uso de locomotivas de pequenas dimensões adaptadas para o transporte de carga contentorizada, ou seja, capazes de transportar até 5 carruagens. Cada carruagem terá a capacidade de ser carregada com um contentor de 40 pés ou dois contentores de 20 pés, como exemplificado na Figura 17 [1]. A contentorização da mercadoria potencializa o uso da ferrovia, criando condições para o carregamento e descarregamento de carga mais rápido e eficaz [26].

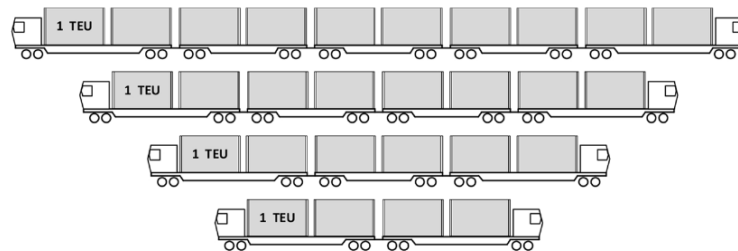


Figura 17 - Representação do sistema LFR [1]

As duas locomotivas em cada uma das extremidades permite a fácil manobrabilidade da mercadoria num ponto de carga e descarga, podendo o respetivo comboio ser acoplado a outro diretamente eliminando a necessidade de desacoplamento e acoplamento de carruagens. O sistema LFR pelo seu tamanho e características pode apresentar duas versatilidades [1]:

1. Envio direto do transportador ao cliente;
2. Como sendo um dos meios de transportes intervenientes numa cadeia logística.

Este tipo de locomotiva denominada de “*truck on tracks*” foi testado na ferrovia alemã nos anos noventa do século passado, sobre o nome de “*Cargo Sprinter*”. O projeto acabou por ser encerrado na altura por apresentar dificuldades em consolidar carga suficiente proveniente de vários emitentes para formar o comboio. No entanto, foi verificado na altura a minimização do consumo de combustível [26].

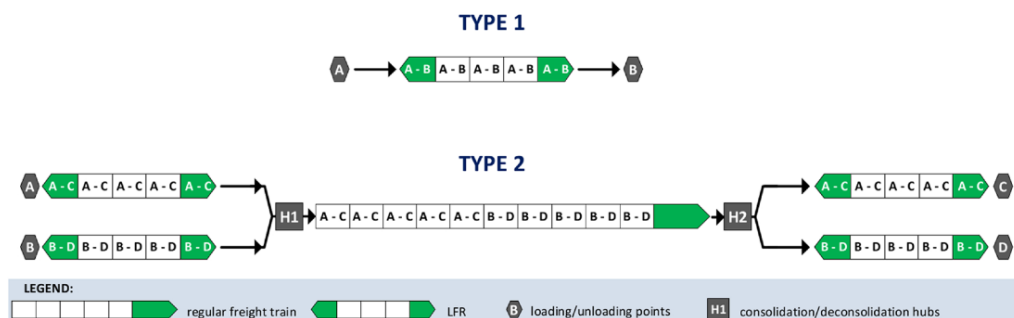


Figura 18 - Possibilidades do uso do sistema LFR [1]

O conceito de LFR é principalmente para ser utilizado no abastecimento de negócios que se encontrem dentro e fora das zonas urbanas. A versatilidade do sistema como representado na Figura 18 permite o uso deste a nível regional, inter-regional, nacional e internacional, podendo o LFR ser acoplado a um comboio de maior capacidade como se fosse um atrelado. Passando assim o LFR a pertencer a um dos elementos do transporte intermodal. Este novo método de transporte poderá apresentar-se como um dos principais concorrentes ao transporte rodoviário de longa distância, podendo este ser eliminado ou passar apenas a realizar funções de último meio de transporte, como representado na Figura 19 [1].

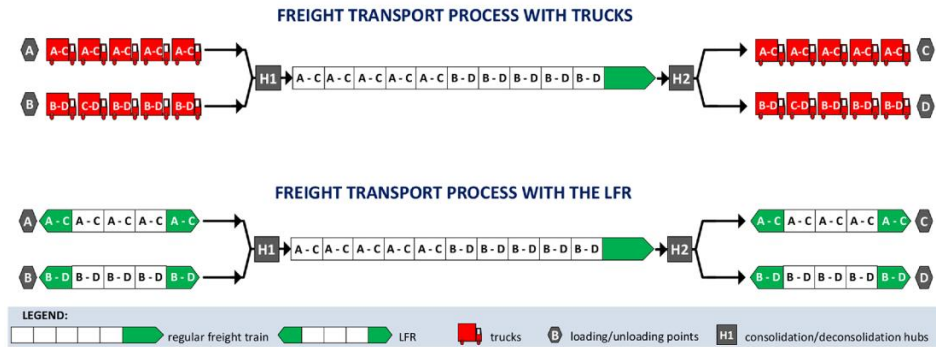


Figura 19 - Substituição do Transporte rodoviário pelo LFR [1]

Para o sucesso da implementação do LFR irá ser necessário a criação de pontos de consolidação e desconsolidação ao longo da ferrovia. A criação destes pontos permitirá a concentração de carga proveniente de vários clientes num único ponto, criando um entreposto, para que seja enviada em conjunto e a separação da carga num único ponto para o envio a diferentes destinatários, Figura 20 e Figura 21. Estes pontos irão permitir que diferentes clientes com pouca carga enviem as suas encomendas a preços competitivos através da ferrovia, podendo esta ser consolidada com outras cujo destino seja o mesmo [26].

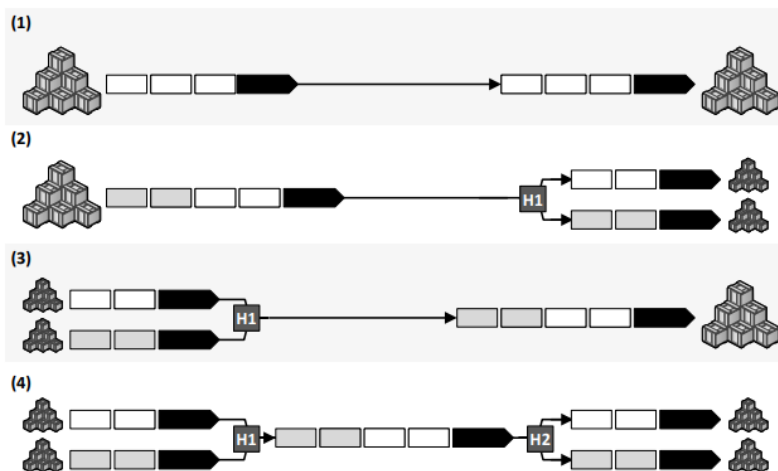


Figura 20 - Consolidação e desconsolidação da carga [26]

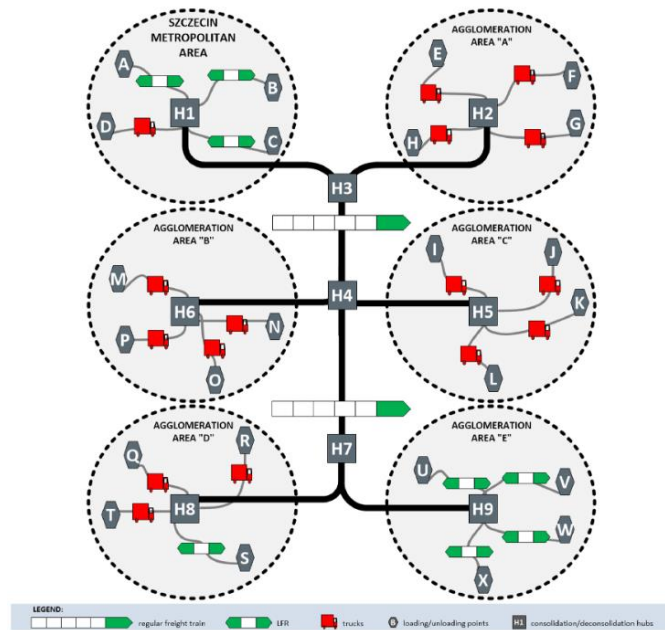


Figura 21 - Conceito do sistema LFR em conjugação com transporte rodoviário [26]

O veículo a ser utilizado no LFR apresenta as seguintes características:

- Leve, curto e bidirecional;
- Opera em infraestruturas com parâmetros limitados;
- Utilizado num sistema push-pull;
- Opera em áreas urbanas com espaços limitados;
- Eficiente economicamente e energeticamente no transporte de cargas [1].

Alguns benefícios que os clientes poderão beneficiar do uso deste novo modo de transporte apresentam-se nas áreas dos custos, benefícios, fatores limitadores e de suporte do sistema, Tabela 7. Algumas das áreas identificadas por peritos que seriam afetadas pelo uso do LFR são as infraestruturas, os meios de transporte, a organização do mercado de transporte, os modelos económicos aplicados e o ambiente [1].

Tabela 7 - Custos, benefícios e fatores limitadores e de suporte do sistema LFR [1]

Custos	Benefícios	Fatores limitadores	Fatores de suporte
- Infraestruturas para carga e descarga	- Uso mais eficiente das infraestruturas ferreas existentes	- Eleveda competição do transporte rodoviario	- Autonomia do LFR
- Veiculos LFR	- Revitalização das areas envolvente às infraestruturas	- Habitots de metodologia de transporte	- Funcionamento de parques industriais
- Taxa de acesso às infraestruturas ferreas	- Redução do número de camiões na estrada	- Organização do transporte ferroviario	- Planeamento e implemetação da infraestruturra ferrea com
	- Redução de congestionamentos nas estradas	- Perceção do transporte ferroviario não ser atraente	- Planeamento e implementação de acesse
	- Redução do ruído	- Perceção do transporte ferroviario não ter evoluído	- Instalações universais para o transporte ferroviario
	- Redução da poluição do ar	- Tempos de transporte da ferrovia	
	- Aumento da segurança nas estradas		
	- Diminuição de mudanças transmodais desfavoraveis		
	- Aplicação de políticas de transporte da EU		
	- Aumento da atratividade para o investimento nas zonas rurais		
	- Implenetação de um sistema de duas vias para passageiros e		

A utilização de um comboio do tipo do sistema LFR, significa a substituição de até 10 semi-reboques na estrada, que leva a que se observem as seguintes permissas [1]:

- Redução da poluição do ar e sonora;
- Uso de menos espaço da infraestrutura de transporte – os semi-reboques são, por questões de segurança, obrigados a manter uma distância estipulada por lei para o carro seguinte;
- Redução de congestionamentos das estradas em meio urbano e regional;
- Aumento da segurança nos transportes – os sistemas de controlo presentes na ferróvia garantem uma segurança superior do transporte;
- Redução da deterioração das estradas.

## 2.2. Transporte Rodoviário

O transporte rodoviário de mercadorias encontra-se por lei condicionado quanto às dimensões máximas permitidas e ao peso bruto (tara + carga) do conjunto veículo – reboque. Quanto às dimensões máximas do veículo, o decreto-lei nº132/2017 descreve que [27]:

- Comprimento máximo do conjunto veículo a motor – semireboque de três ou mais eixos não ultrapasse os 16,50 m;
- Largura máxima do veículo não ultrapasse 2,55 m, ou caso seja um veículo de transporte condicionado ou contentores não ultrapasse os 2,60 m;
- Altura máxima do veículo não ultrapasse 4,00 m, ou caso seja um veículo de transporte de contentores normalizados ISSO de comprimento não superior a 45 pés não ultrapasse os 4,60 m;
- É permitido a circulação do conjunto de veículos em configuração Euro-Modelar com comprimento máximo de 25,25 m.

Quanto ao peso bruto máximo do conjunto veículo a motor – semireboque é descrito que [27]:

- Conjunto veículo a motor – semireboque de três eixos não deve ser superior a 29 t;
- Conjunto veículo a motor – semireboque de quatro eixos não deve ser superior a 38 t;
- Conjunto veículo a motor – semireboque de cinco ou mais eixos não deve ser superior a 44 t;
- É permitido a circulação do conjunto de veículos em configuração Euro-Modelar com peso máximo de 60 t.

### 2.2.1. Estimativa da eficiência energética do transporte rodoviário

Os camiões que se encontram em circulação são maioritariamente a combustão, tendo vindo a aparecer nos últimos anos novas alternativas, como os camiões elétricos e a hidrogénio. Os motores de combustão interna (MCI) ao longo dos anos têm vindo a sofrer várias atualizações que permitiram o aumento da eficiência e a diminuição dos consumos. A incorporação de tecnologias como os turbocompressores permitiu também diminuir o tamanho dos motores e por consequência o seu peso [28].

Os motores Diesel utilizados nos camiões apresentam eficiências na ordem dos 42-46%, sendo 53% perdido em forma de calor através do escape e 5% em atritos do motor. A uma velocidade de 80 km/h o atrito entre o pavimento e as rodas e o ar e o camião, é responsável por consumir 40% da potência disponível [28], [29]. A maioria das perdas verificadas no transporte rodoviário provém do motor, sendo este responsável por mais de metade das mesmas, no entanto as restantes perdas relacionam-se com o movimento

do veículo (perdas operacionais). As perdas operacionais podem variar consoante o local em que o veículo circula, autoestrada ou cidade, sendo na circulação em autoestrada as perdas aerodinâmicas o maior responsável pelas perdas, seguido da resistência de rolamento. Em circulação em cidade a travagem (perda de inércia) o maior responsável por perdas operacionais, como demonstrado na Figura 22 [30].

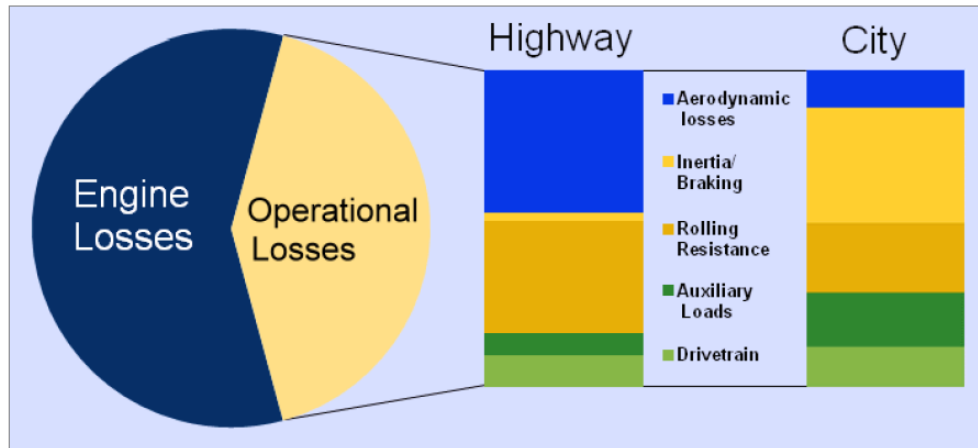


Figura 22 - Perdas energéticas no transporte rodoviário [30]

Para se calcular a eficiência energética de um veículo num determinado percurso é necessário determinar-se as forças que este tem de combater para iniciar e manter o seu movimento, que para um movimento horizontal com uma aceleração ( $a$ ), são dadas pelas equações (22), (23), (24) e (25) [31]:

- Resistência de rolamento

$$R_f = c_r mg \quad (22)$$

$R_f$  – resistência de rolamento [N]

$c_r$  – coeficiente de resistência à rotação [N/kN]

$m$  – massa [kg]

$g$  – gravidade [ $m/s^2$ ]

A resistência de rolamento é dada pelo produto do coeficiente de resistência à rotação ( $c_r$ ), pela massa do veículo ( $m$ ) e pela aceleração da gravidade ( $g$ ). O coeficiente de resistência à rotação ( $f$ ) varia consoante a classificação energética do pneu, Tabela 8 [32].

Tabela 8 - Classificação energética dos pneus [32]

Tire Energy Efficiency Class	Coefficient of Rolling Resistance (N/kN)
A	Lower than 4.0
B	4.1 to 5.0
C	5.1 to 6.0
D	6.1 to 7.0
E	7.1 to 8.0
F	Larger than 8.1

- Arrasto aerodinâmico

$$R_v = \frac{1}{2} \rho c_d A v^2 \quad (23)$$

$R_v$  – arrasto aerodinâmico [N]

$\rho$  – densidade [ $kg/m^3$ ]

$c_d$  – coeficiente de arrasto

$A$  – área [ $m^2$ ]

$v$  – velocidade [m/s]

O arrasto aerodinâmico é dado pelo produto da densidade do ar ( $\rho$ ), pelo coeficiente de arrasto ( $c_d$ ), pela área frontal projetada ( $A$ ) e pelo quadrado da velocidade ( $v^2$ ).

- Resistência de partes rotativas

$$R_r = m a \xi \quad (24)$$

$R_r$  – resistência das partes rotativas [N]

$m$  – massa [kg]

$a$  – aceleração [ $m/s^2$ ]

$\xi$  – coeficiente de inércia das partes rotativas

A resistência de partes rotativas é dada pelo produto da massa do veículo ( $m$ ), pela aceleração ( $a$ ) e pelo coeficiente de inércia das partes rotativas ( $\xi$ ), a Figura 23 demonstra a atuação das forças num automóvel [31].

$$R = R_f + R_v + R_r \quad (25)$$

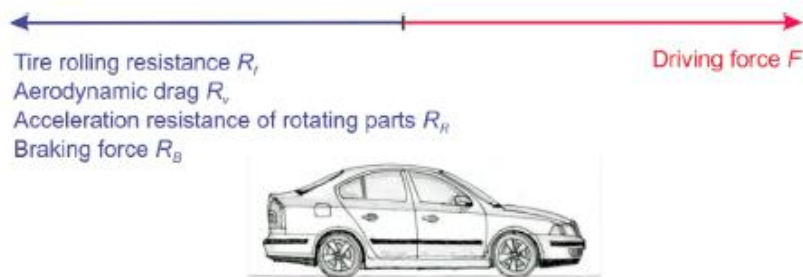


Figura 23 - Forças que atuam no veículo [31]

Caso o veículo se encontre a movimentar num terreno com uma inclinação ( $\alpha$ ), Figura 24, com a horizontal uma resistência adicional é criada devido à inclinação do terreno criando uma resistência oferecida ao movimento, equação (26). As forças que contém os termos  $mg$  passam a ser multiplicadas por  $\cos \alpha$  [31]. Caso o veículo esteja a circular

numa subida a força irá agir como uma resistência ao movimento, logo assumirá um valor positivo, o mesmo não ocorre numa descida em que a força irá ajudar o movimento do carro, assumindo assim um valor negativo, equação (27).

$$R_c = mg \sin \alpha \quad (26)$$

$$R = R_f + R_v + R_r + R_c \quad (27)$$

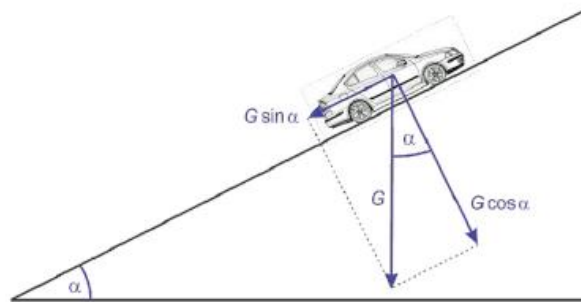


Figura 24 - Influência da inclinação da estrada [31]

A energia total despendida para que se percorra uma distância  $x$ , é igual ao trabalho realizado por uma força motora (motor) num determinado segmento de estrada a uma determinada velocidade e aceleração é dada pela equação (28) [31]:

$$W = \int_{x_0}^{x_1} F \times dx \quad (28)$$

A quantidade total de combustível consumido ( $dC$ ) para se obter o trabalho  $W$  num determinado tempo  $dt$  para uma velocidade conhecida  $v$  é dado pela equação (29) [31]:

$$dC = \frac{dW}{\eta H_v} \quad (29)$$

$\eta$  – rendimento do motor

$H_v$  – poder calorífico do combustível [MJ/kg]

### 2.2.2. Impactos no consumo energético

Assim como acontece na ferrovia o mesmo se sucede na rodovia, a eficiência energética do veículo não depende apenas de tecnologias nele instaladas. A eficiência do veículo está dependente também de fatores exteriores tais como comportamentos do condutor, peso da carga transportada, condições do pavimento e o uso de acessórios do veículo [28], [29].

O aumento da eficiência do modo rodoviário passará pela aplicação de novas tecnologias e soluções alternativas aos combustíveis, como o gás natural, eletricidade e biocombustíveis. A aplicação de novas tecnologias pode implicar grandes reduções no uso de combustível, por sua vez, emissão de gases poluentes. Uma vez que estas tecnologias são maioritariamente utilizadas em camiões que realizam uma grande quantidade de quilómetros anualmente, uma pequena melhoria aplicada a uma população significativa de camiões representar uma grande fatia em reduções [33]. As áreas de estudo dos avanços tecnológicos a implementar no transporte são várias, as estimativas dos potenciais impactos na melhoria da eficiência variam consoante a tipologia e categoria do veículo pesados, Figura 25 [5].

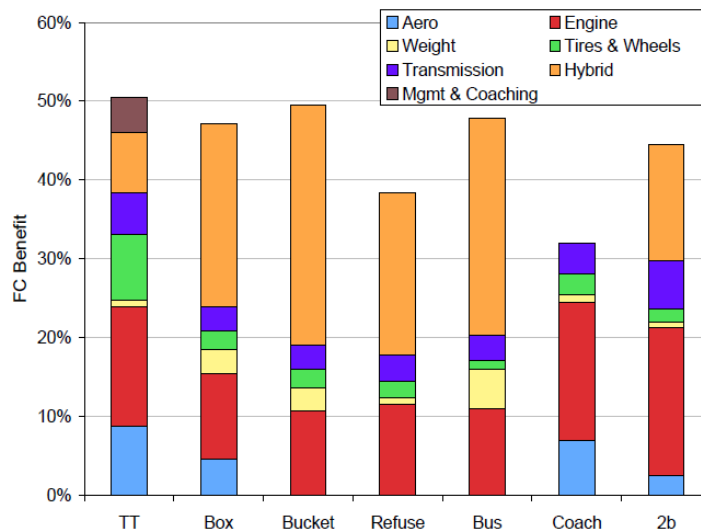


Figura 25 - Aumento da eficiência com a incorporação de novas tecnologias, ao longo de várias categorias de pesados [5]

## Motor

Em condução urbana existe uma perda significativa de energia na paragem e arranque do veículo em sinais de trânsito ou no tráfego. A incorporação de tecnologias como o start/stop permite a paragem e arranque do motor automaticamente, e uma poupança de energia pequena, mas que caso contrário seria desperdiçada [29].

Quando parqueados os camiões fazem uso do motor para alimentar acessórios elétricos ou para aquecer ou arrefecer a cabine, o que representa uma forma ineficiente de alimentar os aparelhos. É estimado que o motor de um camião seja ligado para alimentar acessórios entre 1000 a 5000 horas por ano. Uma solução para alimentar eletricamente as cabines dos camiões é a presença de um gerador de menores dimensões (quando comparado com o motor do camião) que será o responsável pelo fornecimento de eletricidade que poderá alimentar uma unidade de ar condicionado para arrefecimento e aquecimento da cabine ou ser alimentado diretamente pela rede elétrica. A incorporação de um gerador pode representar uma poupança de 3 litros por cada hora que o motor estaria ao ralenti [28].

A maior hipótese de redução do consumo de combustível continua a ser o aumento da eficiência no MCI e na eletrificação dos MCI. O ciclo de quatro tempos continua a ser o modo de funcionamento mais utilizado nos MCI, alimentado por diesel, gasolina ou gás natural. O aumento da eficiência térmica dos MCI continua a ser o grande foco, permitindo melhores consumos e redução de emissões [5].

Alguns dos caminhos para o aumento da eficiência térmica dos motores são [5], [33]:

- Utilização de recuperação de calor, para a diminuição do calor perdido;
- Aumento da razão de compressão, através da diminuição da cilindrada e rotação dos motores;
- Redução de perdas na combustão e atritos internos;
- Melhorias nos sistemas de combustão e da combustão na câmara.

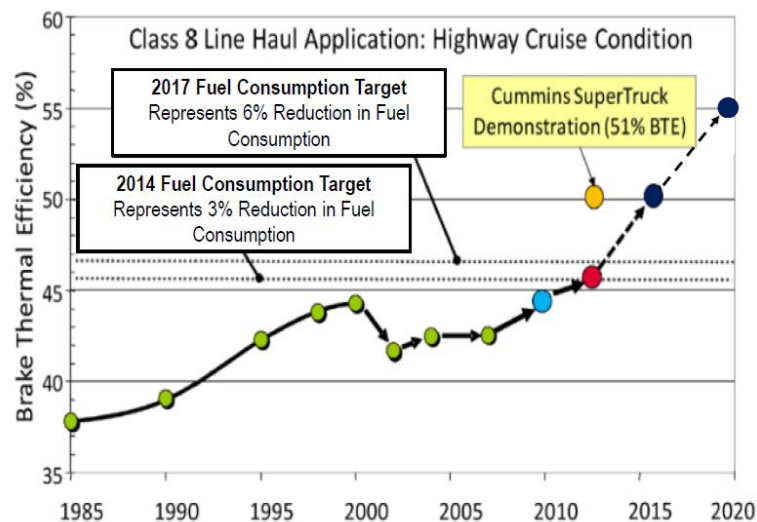


Figura 26 - Evolução da eficiência térmica dos motores em condições de autoestrada em veículos pesados [5]

A incorporação de tecnologias como os veículos híbridos elétricos (HEV) e veículos elétricos (BEV) são as que apresentam maior potencial para a redução dos consumos e das emissões. A Figura 26 ilustra a evolução da eficiência ao longo dos anos nos camiões.

## Aerodinâmica

Num estudo realizado pela parceira da Volvo em peças aerodinâmicas para atrelados, Ridge Corp./FreightWing estimou-se que com os pacotes aerodinâmicos disponíveis era possível alcançar uma poupança de 10% no consumo [33].

O atrito criado pelo movimento do veículo no ar representa cerca de 30% das forças que o veículo terá de combater para se movimentar, no entanto, a resistência aerodinâmica aumenta com o aumento da velocidade. Estas forças podem ser diminuídas através da diminuição da área frontal, alisamento da superfície ou alteração da forma do camião [29]. O coeficiente de atrito nos camiões em 1970 era 0,8, passando a 0,6 em 2000 e

atualmente encontra-se em 0,45. A incorporação de equipamentos que visam o melhoramento aerodinâmico permitem poupanças no consumo. Alguns desses equipamentos são [28]:

- Defletores de tejadilho;
- Extensores de cabine;
- Defletores laterais de cabine e do atrelado;
- Extensor traseiro do atrelado;
- Geradores de vórtices traseiros.



Figura 27 - Equipamentos aerodinâmicos para caminhões [34]

Os defletores de cabine e de atrelado previnem que grandes quantidades de ar circulem debaixo do atrelado, agilizando a passagem do caminhão pelo ar, Figura 27 . O extensor traseiro do atrelado permite a suavização da circulação de ar em torno do caminhão, prevenindo a criação de áreas de baixa pressão atrás do mesmo. Os defletores de tejadilho e os extensores de cabine ajudam a direcionar o ar e a que este circule em torno do caminhão mais suavemente. A redução da abertura entre o caminhão e o atrelado, que previne que o ar fique preso, de 115 cm para 63,5 cm, provoca um melhoramento do coeficiente de atrito. E representa um melhoramento nos consumos de 1% a 2% [28], [33]. A Figura 28 indica os possíveis ganhos na redução dos consumos com a instalação de equipamentos aerodinâmicos, com os equipamentos instalados no tejadilho a mostrarem-se os mais eficientes [30].

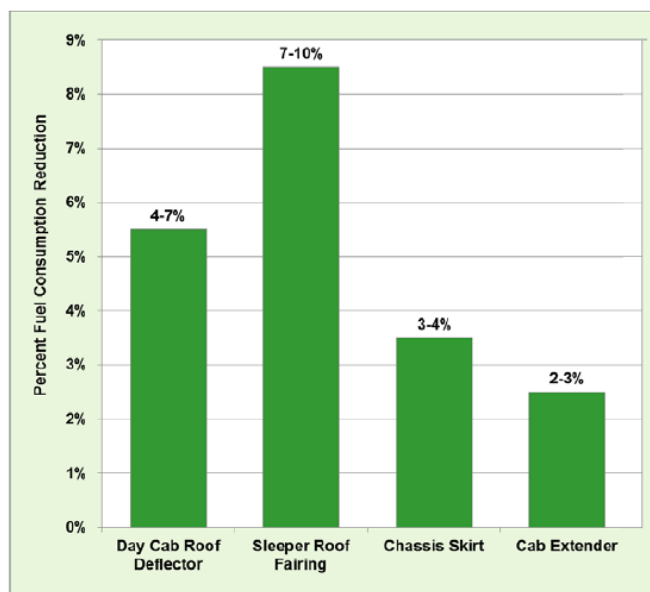


Figura 28 - Redução do consumo com a instalação de equipamentos aerodinâmicos [30]

### Uso de pneus largos e pressão apropriada

A substituição dos pneus duplos no caminhão e no atrelado por pneus mais largos, permitem a diminuição do atrito entre o pneu e o pavimento e a redução de peso, levando à diminuição dos consumos. Vários fabricante de pneus já oferecem este tipo de solução que segundo os mesmos permite reduzir os consumos entre 2% a 5%. A inclinação do terreno também influencia a redução do consumo, Figura 29, com a substituição por pneus largos [28], [30]. O redesenho do traçado dos pneus e o uso de novos materiais também podem ajudar a aumentar a eficiência [33].

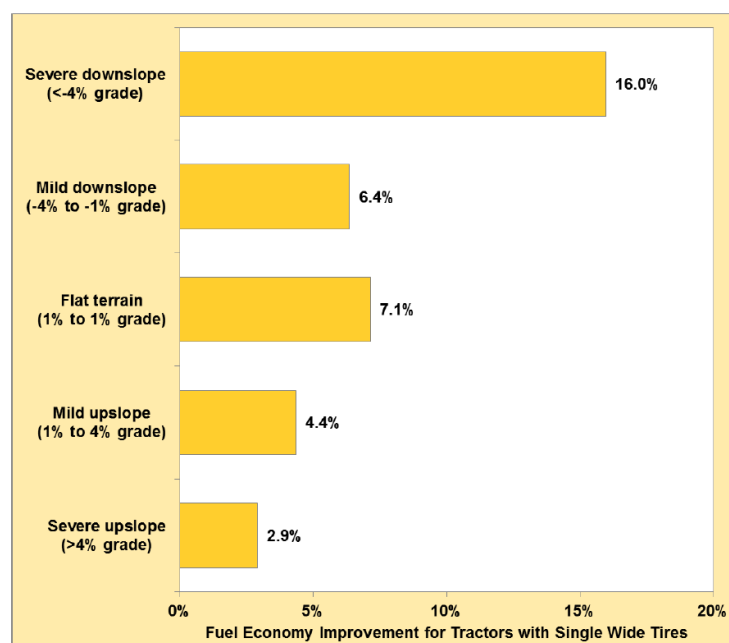


Figura 29 - Aumento da eficiência com o uso de pneus largos [30]

O uso de pneus largos, Figura 30, permite uma manutenção mais rápida, maior estabilidade e tração [35]. A manutenção da pressão apropriada dos pneus previne o aumento da resistência de rolamento. O uso de pneus com uma pressão abaixo do requisitado leva a que haja um aumento do desgaste e falhas nos pneus e um aumento do consumo do veículo. O uso de sistemas de automáticos de manutenção de pressão dos pneus permitem o controlo contínuo da pressão e assim proceder ao enchimento dos mesmos. A diminuição da pressão dos pneus em 0,7 bar, pode levar a um aumento em 2% da resistência de rolamento e um aumento do consumo de combustível entre 0,5% e 1% [28].

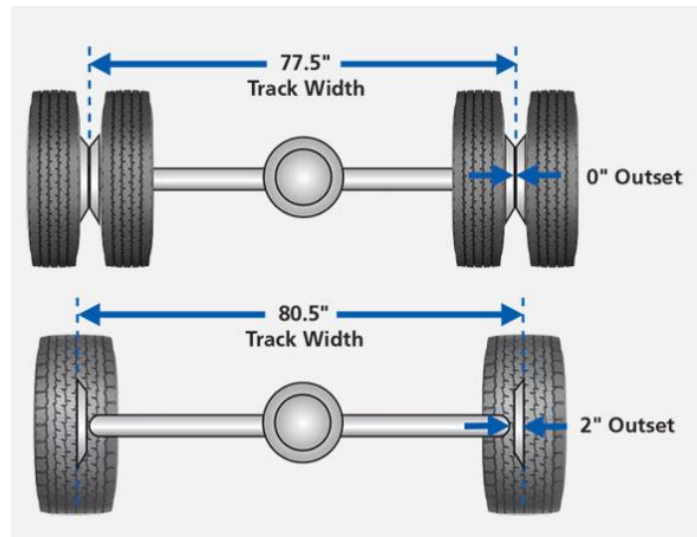


Figura 30 - Pneus duplos vs Pneus largos [35]

### Redução do peso e velocidade de circulação

A velocidade e forma de condução praticada pelos condutores são um dos principais responsáveis pelas prestações verificadas nos consumos. Os consumos em camiões aumentam significativamente com a velocidade, a redução da velocidade de circulação representa uma diminuição dos consumos energéticos [28].

A redução do peso do veículo (tara) através do uso de materiais leves, como é o caso do alumínio que apresenta elevada resistência e baixo peso, permite também a redução dos consumos do veículo e potencialmente, caso a redução seja elevada, transportar mais carga [28]. A redução de 10% na tara do veículo pode representar um corte nos consumos de 4% a 8% [29].

Um estudo realizado nos Estados Unidos da América, numa estrada nivelada a velocidade constante, com o objetivo de verificar a influência do peso transportado nos consumos do veículo, concluiu que o aumento do peso no veículo aumenta os consumos do mesmo, Figura 31. No entanto as toneladas transportadas por litro de combustível gasto aumentam, o que significa que a diminuição da eficiência do veículo é compensada pela quantidade de mercadoria transportada. Por exemplo o transporte de 60 toneladas de mercadoria é mais eficiente quando feito por apenas um camião do que em dois, pois dois

veículos iriam gastar cerca de 52 l/100 km (18 mpg), ou seja 26 cada, enquanto apenas um veículo iria gastar 29.5 l/100 km (8 mpg) [30].

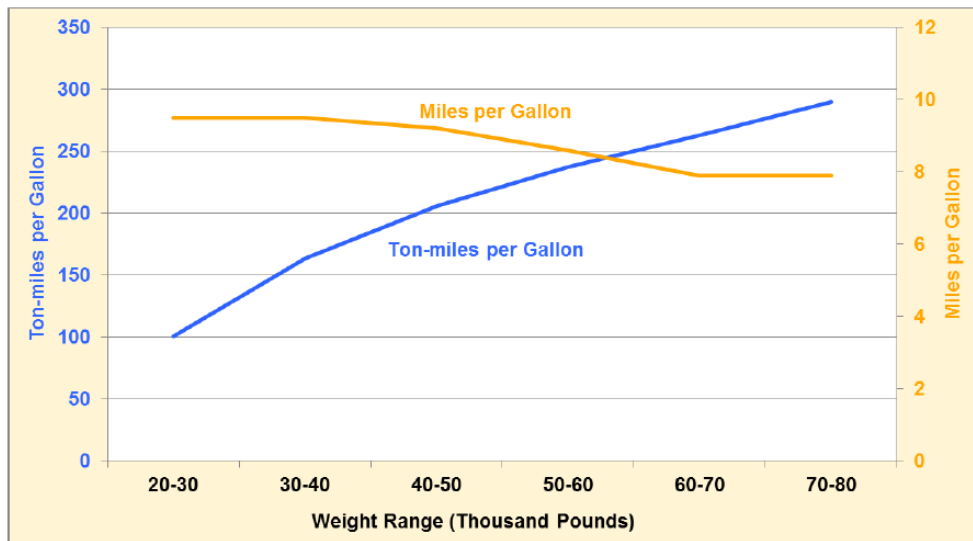


Figura 31 - Consumo do transporte rodoviário com a variação do peso transportado [30]

### Treinos de melhoria dos comportamentos do condutor

Os comportamentos do condutor praticados durante a viagem têm um grande impacto na eficiência energética do veículo. Este é independente do quão económico o veículo se poderá apresentar. Alguns dos comportamentos do condutor que influenciam a eficiência do veículo e devem ser alvo de instrução para uma condução mais eficiente são o controlo da aceleração, a técnica de introdução de mudanças, escolha da rota e número de paragens ao longo da mesma [28].

O uso de sistemas de assistência à condução como o cruise control preditivo que utiliza a base de dados do GPS para visualizar a estrada à frente e ajustar a velocidade de acordo com a inclinação do terreno e o sistema de eco-feedback para guiar o condutor a obter uma condução mais eficiente possível. Estes tipos de sistemas podem ajudar os condutores durante a condução e assim melhorar a eficiência do veículo [33].

Num estudo realizado com camiões em que o seu consumo médio é de 32 l/100 km em terreno plano, estes foram colocados a circular nas mesmas condições com exceção de o terreno em que circulavam apresentava diferentes inclinações. Assim foi possível verificar que uma inclinação ascendente severa do terreno pode provocar uma diminuição da eficiência do veículo em 60% e uma inclinação descendente severa do terreno pode provocar um aumento da eficiência do veículo em 221%, Figura 32 [30].

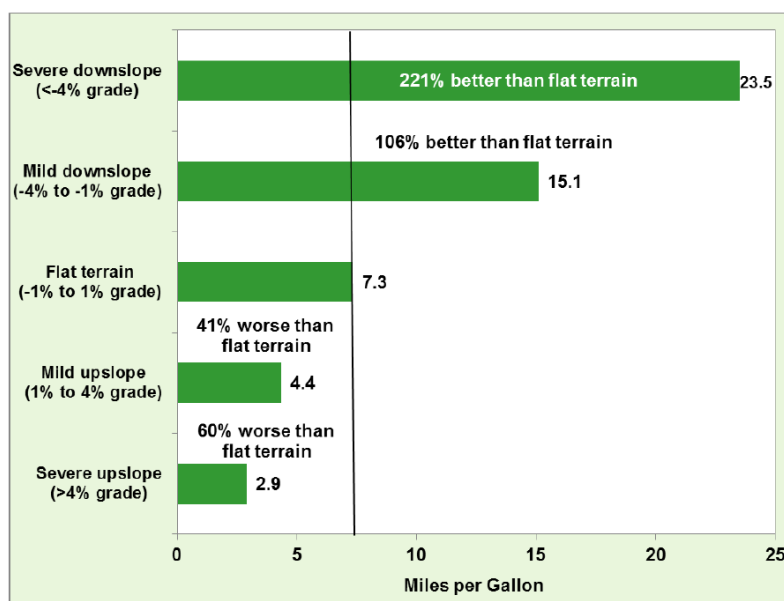


Figura 32 - Influência da inclinação do terreno nos consumos do transporte rodoviário [30]

É estimado que um bom condutor apresente um consumo de combustível menor em 35% quando comparado com um mau condutor [28]. Uma forma eficaz de promover e recompensar o condutor por ter uma condução eficiente é a monitorização do desempenho e oferta de incentivos pela redução do consumo. Bem aplicados estes programas de monitorização e incentivos podem ser muito eficazes na mudança no estilo de condução dos condutores. A implementação de programas de instrução de melhores praticas de condução eficiente podem alcançar poupanças entre os 5% e os 20%, consoante o condutor [28].

### **Possibilidade de poupança com a adoção de algumas tecnologias**

A Figura 33 ilustra o potencial da instalação de algumas tecnologias para a redução dos consumos energéticos no transporte rodoviário. Segundo (Delgado et al., 2017) as tecnologias que apresentam maior potencial são as que se relacionam com o movimento do veículo, como a aerodinâmica e resistência de rolamento, seguido de tecnologias de eletrificação do veículo. Associado às reduções dos consumos nos veículos pesados está inerente a correspondente redução de emissões de gases poluentes para a atmosfera.

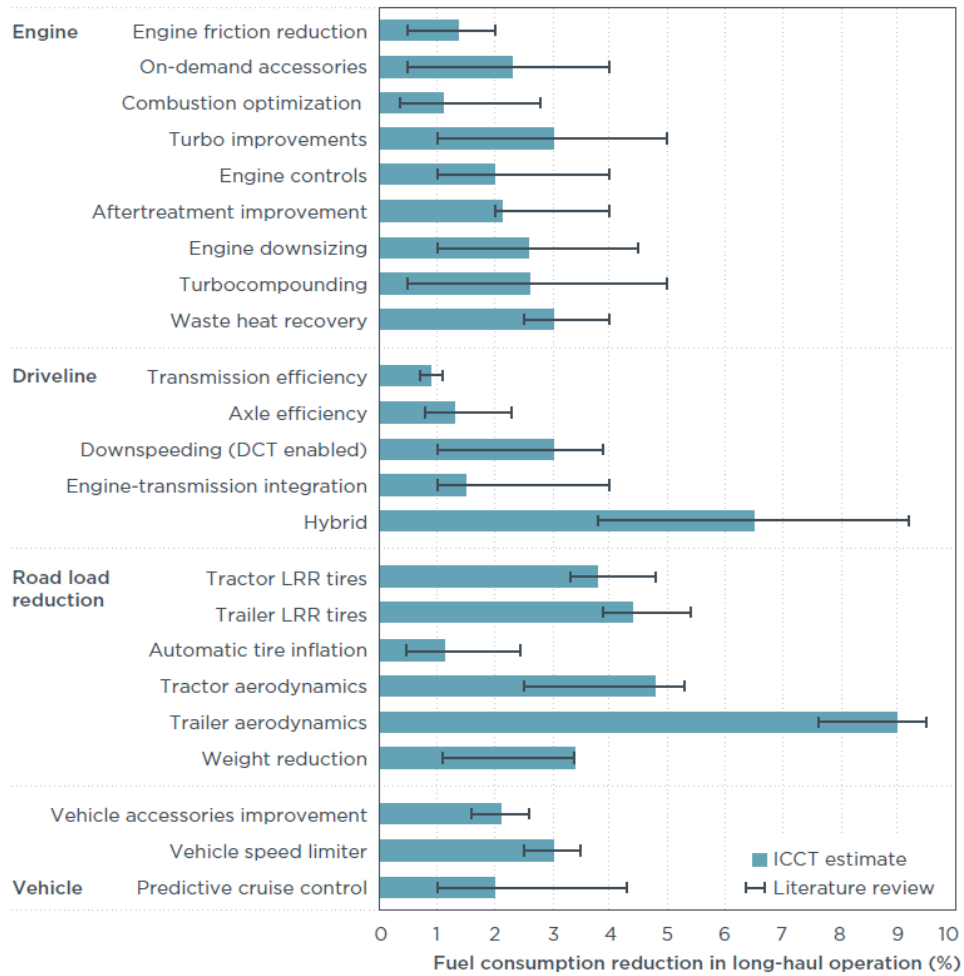


Figura 33 - Potencial para a redução do consumo no transporte rodoviário de algumas tecnologias [32]

### 3. Metodologia

Com a análise a seguir apresentada é esperado retirar um conjunto de ilações que irão ajudar a compreender os gastos energéticos que ocorrem numa viagem de transporte de mercadorias, quando a mesma é realizada por dois tipos distintos de transporte: Ferrovia e Rodovia.

Algumas das questões às quais se pretende chegar a uma conclusão são:

1. Qual dos dois transportes é o mais energeticamente sustentável?
2. Qual dos dois transportes é responsável pela emissão de mais gases com efeito estufa?
3. Até que distância é compensável, em termos energéticos e de emissões, a utilização de certo meio de transporte?
4. Compensa uma mudança para uma maior quantidade de transporte efetuado pela ferrovia?

A análise efetuada nesta dissertação assenta num estudo a nível macroscópico. O estudo macroscópico é realizado a partir de valores médios que se observaram em outros ensaios da mesma natureza e que apresentam uma aproximação á realidade verificada, no entanto não incorporam dados como a eficiência do veículo, a tipologia do terreno e a destreza do condutor. A partir destes dados é possível estruturar um conjunto de valores fidedignos que iram permitir o cálculo de um novo conjunto de valores adaptados a uma nova realidade, e assim retirar algumas conclusões.

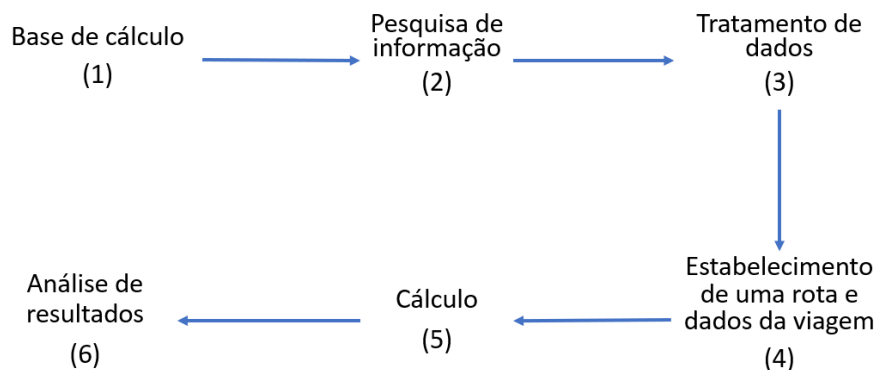


Figura 34 - Procedimento seguido para obtenção de resultados

A Figura 34 ilustra a base esquemática do procedimento que se teve em consideração para a obtenção dos resultados pretendidos. Desta forma, foi primeiro necessário estabelecer a base de cálculo a se seguir de forma a se obter os resultados pretendidos, a seguir foi-se à procura de informação relevante a ser aplicada na base de cálculo estabelecida. Após obter a informação necessária, passa-se ao tratamento da mesma estabelecendo assim uma base de dados a ser utilizada ao longo da dissertação. O quarto passo será encontrar uma rota com características relevantes para o tipo de estudo e em

seguida proceder ao cálculo dos parâmetros pretendidos de serem avaliados e à análise de resultados provenientes do cálculo.

### 3.1. Tratamento de dados

Este capítulo aborda os passos e considerações nas decisões tomadas na análise e obtenção de resultados dos casos de estudo abordados. As equações, métodos de cálculo e organização do pensamento também são utilizados num capítulo mais adiante que é denominado de Mapas Energético e de Emissões.

#### 3.1.1. Obtenção de dados

O primeiro passo a efetuar antes de se iniciar os cálculos, é a obtenção de dados e valores que irão ser relevantes para o avanço do estudo e a criação de cenários adequados à realidade. Alguns dos dados que se pretendem obter são as características dos veículos, condições de circulação e os consumos e respetivas emissões de CO<sub>2</sub> apresentadas pelos veículos.

As características mais importantes a recolher do veículo são a tara, a capacidade máxima de transporte (carga máxima), o seu comprimento e velocidade máxima. No caso da ferrovia é necessário verificar as características da locomotiva e dos vagões, pois este tem de obedecer a um conjunto de regras mais rigoroso que a rodovia, como é o caso de comprimentos, pesos e velocidades máximas para os comboios exigidos pelas linhas onde circulam.

As características de algumas locomotivas e vagões foram retiradas de locomotivas elétricas e vagões para contentores pertencentes à MEDWAY, como é mostrado na Tabela 9. A

Tabela 10 mostra algumas das características técnicas de camiões e atrelados para o transporte de contentores.

Tabela 9 - Características técnicas de vagões e locomotivas elétricas [36], [37]

Vagão Contentor				Locomotivas Elétricas		
Tara [ton]	Carga máx. [ton]	Comprimento [m]	Vel. Máx [km/h]	Tara [ton]	Vel. Máx [km/h]	Comprimento [m]
26,8	108,6	26,39	100	120	120	23,02
32,5	102,5	33,94	120	86	140	19,58
21,6	68,4	19,74	120	87	220	20,38
20,5	59,5	14,04	100			
17,5	62,5	14,04	100			
11,9	28,1	13,86	120			
22,5	60,6	14,04	120			
<b>Média</b>	<b>21,9</b>	<b>70</b>	<b>111</b>	<b>98</b>	<b>160</b>	<b>21</b>

Tabela 10 - Características técnicas de vagões e locomotivas elétricas  
 [38],[39],[40],[41],[42],[43],[43] ,[44],[45],[46],[47],[48],[49],[50]

Camião		Atrelado	
Modelo	Tara [ton]	Modelo	Tara [ton]
Volvo FH13500	8,172	Schmitz	5,686
Ford Fmax 500	8,547	Renders Euro 800	6,3
DAF XG 480	8,194	Renders Euro 951	5,6
Mercedes Actros 1851	8,381	Oktar	3,85
Mercedes Actros 1845	8,296	Krone	5,28
Iveco Tway 510	9,086	Renders Euro 925	5,8
Scania R410	8,334	Lecitrailer 3E20	4,11
MAN TGX 18430	7,848	LAG 20	3,12
Renault T 440	7,476	LAG O3CC	3,58
Iveco Sway 460	8,048		
DAF XF 530	8,237		
Volvo FH500	9,405		
Mercedes Actros 1942	7,653		
Scania S580	9,077		
Média	8,34		4,81

As condições de circulação de um veículo relacionam-se com parâmetros verificados ao longo dos anos que caracterizam a utilização do meio de transporte, tal como a quantidade média de carga transportada, a velocidade média de circulação em certas estradas e linhas férreas e condições legais impostas para a circulação segura dos veículos de mercadorias.

De forma a estimar a quantidade total de energia utilizada numa viagem é necessário conhecer os consumos típicos dos veículos utilizados. Assim através de um conjunto dados de consumos verificados em estudos ao longo dos anos criou-se uma base de dados. Os consumos obtidos para a ferrovia correspondem a valores para locomotivas elétricas. Num estudo inicial apenas foram considerados os consumos de locomotivas elétricas, uma vez que a rede férrea em Portugal se apresenta quase totalmente eletrificada. A razão por detrás desta escolha foi feita tendo em conta a evolução da tecnologia e os caminhos tomados pelos governos europeus na eletrificação, e também pela significativa diferença na eficiência de uma locomotiva elétrica, quando comparada com uma a diesel como demonstrado em cima.

Tabela 11 - Consumos para transporte ferroviário, provenientes de referências bibliográficas

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,2596	MJ/ton.km	52,54	ton	[8]
0,2468	MJ/ton.km	82,54	ton	[8]
0,29	MJ/ton.km			[51]
0,33	MJ/ton.km			[51]
0,24	MJ/ton.km			[51]
0,44	MJ/ton.km			[51]
0,35	MJ/ton.km			[51]
0,04	MJ/ton.km			[52]
25,03	wh/t.km			[53]
30,02	wh/t.km			[53]
0,456	MJ/ton.km			[54]
0,368	MJ/ton.km	580	ton	[54]
23	MJ/100ton.km			[9]
35,2	MJ/100ton.km			[9]
0,25	MJ/ton.km	1300	ton	[55]
0,031	kWh/t.km	1305	ton	[56]
0,05	kWh/t.km	1472	ton	[56]
0,097	kWh/t.km	642	ton	[56]
0,03028	kWh/t.km	445	ton	[57]
0,02194	kWh/t.km	445	ton	[57]
0,02725	kWh/t.km	445	ton	[57]
0,03192	kWh/t.km	540	ton	[57]
0,0239	kWh/t.km	540	ton	[57]
0,08	MJ/ton.km	1715	ton	[58]
0,16	MJ/ton.km	945	ton	[58]
0,071	MJ/ton.km	1940	ton	[58]
0,07	MJ/ton.km	2058	ton	[58]
0,14	MJ/ton.km	1134	ton	[58]
0,069	MJ/ton.km	2231	ton	[58]

Tabela 12 - Consumos para transporte rodoviário pesado, provenientes de referências bibliográficas

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,3	l/km	40	ton	[59]
0,35	l/km	40	ton	[59]
3,11	MJ/ton.km			[51]
2,93	MJ/ton.km			[51]
2,58	MJ/ton.km			[51]
3,57	MJ/ton.km			[51]
2,87	MJ/ton.km			[51]
0,32	MJ/ton.km			[52]
0,6	MJ/ton.km			[52]
110	MJ/100ton.km			[9]
25	l/100km			[60]
30	l/100km	26	ton	[61]
45	l/100km	40	ton	[61]
36,1	l/100km	20	ton	[62]
52,7	l/100km	30	ton	[62]
2,5	l/100 t.km	25+veículo	ton	[63]
1,5	l/100 t.km	25+veículo	ton	[63]
1,2	l/100 t.km	25+veículo	ton	[63]
4,1	l/100 t.km	12,5+veículo	ton	[63]
2,3	l/100 t.km	12,5+veículo	ton	[63]
2,1	l/100 t.km	12,5+veículo	ton	[63]
3,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,2	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,8	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
0,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
3	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,7	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
0,9	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
4,6	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
3,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,6	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,8	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,7	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,4	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]

A partir dos dados recolhidos é perceptível que os consumos apresentados pelos transportes apresentam-se relacionados com a quantidade de carga transportada, verificando-se que os consumos em geral tanto do transporte rodoviário como ferroviário aumentam com a quantidade de carga transportada. Nos dados reunidos tem-se em consideração que quando não é apresentada carga transportada, os dados são considerados como sendo para um transporte de mercadoria com carga máxima possível transportar.

As emissões de gases de estufa, nomeadamente CO<sub>2</sub>, são determinadas a partir da energia total gasta na viagem. As emissões provocadas pelas locomotivas elétricas são determinadas através do mix elétrico da produção de eletricidade em Portugal, uma vez que o fornecimento e uso de eletricidade nas locomotivas não produz emissões, no entanto a produção da mesma é responsável pela emissão de gases com efeito estufa. A Figura 35 ilustra as emissões de CO<sub>2</sub> emitidas por cada megawatt de eletricidade produzida em Portugal, o valor assumido é o 0,151 tCO<sub>2</sub> eq/MWh, o equivalente a 41,94 gCO<sub>2</sub> eq/MJ. O valor assumido foi o de Portugal continental para o ano de 2021 por representar os dados mais recentes e os avanços na produção de eletricidade, ainda também pelo facto de o estudo centra-se em rotas feitas no continente.

Região	Unidade	Ano 2021	Média 5 anos 2017-2021
Portugal Continental	tCO <sub>2</sub> eq./MWh	0.151	0.234
Região Autónoma da Madeira	tCO <sub>2</sub> eq./MWh	0.465	0.499
Região Autónoma dos Açores	tCO <sub>2</sub> eq./MWh	0.462	0.450
<b>Portugal</b>	<b>tCO<sub>2</sub> eq./MWh</b>	<b>0.162</b>	<b>0.242</b>

Figura 35 - Emissões emitidas por cada MWh de eletricidade produzida em Portugal [64]

A produção de emissões por camiões é calculada também a partir da energia total utilizada e da emissão de CO<sub>2</sub> esperada para a combustão de diesel (C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>) [65], [66]. A (30) determina a quantidade de CO<sub>2</sub> formado a partir da forma da molécula química do combustível (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>) emitido por cada quilograma de combustível comburido. Assim para C<sub>12</sub>H<sub>23</sub> a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida é:

$$F_{e \text{ diesel}} = \frac{44 \times x}{12 \times x + y + 16 \times z} = 3,16 [kg_{CO_2}/kg_{combustível}] \quad (30)$$

Sabendo o total de energia despendido numa viagem, segundo [67] sabe-se que 1 kg de diesel é o equivalente a 44 MJ de energia. Assim as emissões de CO<sub>2</sub> de uma perspectiva TTW é dada pela multiplicação do fator de emissões pela divisão da energia total despendida na viagem por 44 MJ.

$$E_{CO_2} = F_{e \text{ diesel}} \times \frac{\text{Energia despendida}}{44} [kg_{CO_2}] \quad (31)$$

A Figura 36 mostra as emissões média esperadas para a combustão e a produção de combustíveis. Para se obter uma perceção das emissões em WTW para o combustível diesel, este é responsável pela emissão de 90 gCO<sub>2</sub> eq/MJ.

Fuel type	TtW CO <sub>2</sub> content [gCO <sub>2</sub> e/MJ]	TtW CO <sub>2</sub> emissions [gCO <sub>2</sub> e/MJ]	WtT CO <sub>2</sub> emissions [gCO <sub>2</sub> e/MJ]	WtW CO <sub>2</sub> emissions [gCO <sub>2</sub> e/MJ]
Petrol fossil	73	73	19	92
Diesel fossil	73	73	17	90
LPG	65	65	8	73
CNG (EU mix)	56	56	12	68
LNG road	56	56	17	73
Ethanol - EU mix	71	0	52	123
Biodiesel EU mix (FAME)	76	0	39	115
HVO EU mix	71	0	30	101
Biodiesel (incl. HVO) - EU mix	75	0	37	112
Heavy fuel oil (HFO)	77	77	10	87
Marine gas oil (MGO)	75	75	14	89
Kerosene	73	73	14	88

Sources: Prussi et al. (2020a), Faber and Kleijn (2020), Lindstad (2019), Bosch et al. (2017).

Figura 36 - Emissões emitidas por vários combustíveis durante a sua produção (WTT) e uso (TTW) [68]

### Tratamento dos dados obtidos

Após a recolha de dados relevantes para o estudo há que realizar o tratamento dos mesmos. Um dos pressupostos que terão de ser assumidos são o peso dos veículos e respetivos atrelados (tara) a utilizar e no caso da ferrovia a quantidade de carruagens acopladas à locomotiva, pois o comprimento de circulação do comboio encontra-se limitado. A (32) representa o peso médio total do veículo que irá ser utilizado neste estudo.

$$Tara = \frac{\sum_1^n \text{Tara do veículo}}{n} \quad (32)$$

A partir da média realizada a partir da (32) é estimado a tara total dos veículos rodoviários e ferroviários a utilizar. No caso da ferrovia também é efetuado uma média

para determinar a carga máxima transportável por carruagem, isto é efetuado devido ao facto de existir uma variedade de carruagens com características distintas. A (33) representa a carga máxima transportável média.

$$Carga\ máxima = \frac{\sum_1^n Carga\ máxima\ da\ carruagem}{n} \quad (33)$$

Para o transporte ferroviário irá se utilizar uma locomotiva conectada a 16 carruagens, este comboio apresenta uma tara de 448 toneladas e uma capacidade de transportar 1120 toneladas de mercadoria, com base nos valores da Tabela 9. Para o transporte rodoviário irá considerar-se uma tara de 13 toneladas para conjunto semirreboque mais atrelado e uma capacidade de transportar 27 toneladas de mercadoria com base nos valores da Tabela 10. Estes valores obtidos tiveram em conta limites máximos de peso e comprimento de circulação na ferrovia e rodovia.

O consumo específico energético dos veículos utilizado para o estudo é medido em megajoules de energia utilizada por tonelada de mercadoria transportada por quilómetro percorrido (MJ/t.km). Nos estudos consultados foi encontrado consumos específicos em unidades diferentes como em quilowatts (kW) ou em litros de diesel (L<sub>d</sub>). Assim para se converter em megajoules os dados aproveitados, multiplica-se por:

$$1\ kWh = 3,6\ MJ$$

$$1\ L_d = 35,8\ MJ$$

Ou seja, 1 quilowatt é o equivalente a 3,6 megajoules de energia e 1 litro de diesel é o equivalente a 35,8 megajoules de energia [69].

Tabela 13 - Consumos acertados para transporte ferroviário, tratamento de dados

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,2596	MJ/ton.km	52,54	ton	[8]
0,2468	MJ/ton.km	82,54	ton	[8]
0,29	MJ/ton.km			[51]
0,33	MJ/ton.km			[51]
0,24	MJ/ton.km			[51]
0,44	MJ/ton.km			[51]
0,35	MJ/ton.km			[51]
0,04	MJ/ton.km			[52]
0,0901	MJ/ton.km			[53]
0,1081	MJ/ton.km			[53]
0,456	MJ/ton.km			[54]
0,368	MJ/ton.km	580	ton	[54]
0,23	MJ/ton.km			[9]
0,352	MJ/ton.km			[9]
0,25	MJ/ton.km	1300	ton	[55]

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,1116	MJ/ton.km	1305	ton	[56]
0,18	MJ/ton.km	1472	ton	[56]
0,3492	MJ/ton.km	642	ton	[56]
0,1090	MJ/ton.km	445	ton	[57]
0,0790	MJ/ton.km	445	ton	[57]
0,0981	MJ/ton.km	445	ton	[57]
0,1149	MJ/ton.km	540	ton	[57]
0,0860	MJ/ton.km	540	ton	[57]
0,08	MJ/ton.km	1715	ton	[58]
0,16	MJ/ton.km	945	ton	[58]
0,071	MJ/ton.km	1940	ton	[58]
0,07	MJ/ton.km	2058	ton	[58]
0,14	MJ/ton.km	1134	ton	[58]
0,069	MJ/ton.km	2231	ton	[58]

Tabela 14 - Consumos acertados para transporte rodoviário pesado, tratamento de dados

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,285	MJ/ton.km	40	ton	[59]
0,3325	MJ/ton.km	40	ton	[59]
3,11	MJ/ton.km			[51]
2,93	MJ/ton.km			[51]
2,58	MJ/ton.km			[51]
3,57	MJ/ton.km			[51]
2,87	MJ/ton.km			[51]
0,32	MJ/ton.km			[52]
0,6	MJ/ton.km			[52]
1,1	MJ/ton.km			[9]
0,2238	MJ/ton.km			[60]
0,4131	MJ/ton.km	26	ton	[61]
0,4028	MJ/ton.km	40	ton	[61]
0,65	MJ/ton.km	20	ton	[62]
0,63	MJ/ton.km	30	ton	[62]
0,895	MJ/ton.km	25+veículo	ton	[63]
0,537	MJ/ton.km	25+veículo	ton	[63]
0,4296	MJ/ton.km	25+veículo	ton	[63]
1,4678	MJ/ton.km	12,5+veículo	ton	[63]
0,8234	MJ/ton.km	12,5+veículo	ton	[63]

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,7518	MJ/ton.km	12,5+veículo	ton	[63]
3,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,2	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,8	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
0,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
3	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,7	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,9	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
1,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
0,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
0,9	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
4,6	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
3,1	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,6	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,8	MJ/ton.km	15,7	ton	[58]
2,8	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,7	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,2	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]
1,4	MJ/ton.km	29,2	ton	[58]

A partir dos valores das Tabela 13 e Tabela 14 foi realizado um boxplot de modo a determinar quais são os valores mais representativos dos consumos específicos para o transporte rodoviário (camiões a diesel) e ferroviário (locomotivas elétricas).

Um boxplot permite a visualização da distribuição dos dados com base em cinco valores: o limite inferior, o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil e o limite superior. Com os cinco valores definidos é possível a identificação de outliers, ou seja, valores que se encontram abaixo do limite inferior ou acima do limite superior que não são representativos para o estudo.

A construção de um boxplot começa com a organização de todos os números por ordem crescente. O primeiro valor a calcular é a mediana que representa o valor central do conjunto de dados, dividindo o mesmo em duas partes. Os segundos valores a calcular são o 1º e o 3º quartil que representam, respetivamente, os valores situados a 25% e 75% do conjunto de dados. Os quartis são calculados da mesma forma que a mediana,

utilizando os valores das duas partes resultantes da mesma. Os limites superior e inferior são calculados a partir das seguintes equações (34) e (35) [70], [71]:

$$LS = Q_3 + 1,5 \times (Q_3 - Q_1) \quad (34)$$

$$LI = Q_1 - 1,5 \times (Q_3 - Q_1) \quad (35)$$

*LI – Limite Inferior*

*LS – Limite superior*

*Q<sub>1</sub> – Valor do 1º quartil*

*Q<sub>3</sub> – Valor do 3º quartil*

Irão ser assumidos três valores, cada um será representativo de um cenário para o consumo específico de cada meio de transporte. Assim o valor do primeiro quartil será considerado o cenário otimista, a mediana representará o cenário normal/médio e o terceiro quartil representará o cenário pessimista. A Tabela 15 indica os valores obtidos para o boxplot e os valores que se consideram para os três cenários de cada transporte, a análise da tabela mostra que não existe nenhum outlier nos valores para o consumo específico dos veículos. Os limites inferiores obtidos são -0,2448 e -2,1375, o que para as análises a efetuar não é um valor que apresente significado, ou seja, o consumo energético médio de um veículo nunca será negativo, no máximo poderia ser nulo.

Tabela 15 - Valores representativos dos cenários assumidos para os meios de transporte ferroviário e rodoviário

Cenário	Valores Boxplot	Transporte Ferroviário [MJ/ton.km]	Transporte Rodoviário [MJ/ton.km]
	Limite Inferior	- 0,2448	-2,1375
Otimista	1º Quartil	0,0881	0,6990
Médio	Mediana/2º Quartil	0,1600	1,4000
Pessimista	3º Quartil	0,3100	2,5900
	Limite Superior	0,6429	5,4265

### Definição da rota e carga transportada

A rota percorrida pelos veículos é um dos principais influenciadores dos consumos energéticos verificados durante uma viagem. A otimização dos percursos permite que os veículos percorram trechos menos exigentes, e possivelmente menos quilómetros para que se leve o menor tempo possível a chegar ao destino, isto leva a grandes poupanças a níveis energéticos, económicos e ambientais. Durante a criação dos percursos teve-se em mente as rotas mais eficientes o que tem em conta aspetos como:

- Trajeto mais direto;
- Trajeto com menor número de quilómetros percorridos;
- Menor tempo de viagem possível;

- Uso de vias em consiga obter uma velocidade constante;
- Uso de vias com o terreno mais nivelado possível.

### Planeamento da rota - Ferrovia

As rotas definidas para a ferrovia tiveram de ser realizadas entre pontos logísticos (estações e terminais de mercadorias) para permitir a intermodalidade quando necessária para chegar ao destino final. Onde é habitual que muitos negócios não estejam ligados aos caminhos de ferro. Para se conhecer estes pontos logísticos em Portugal consultou-se o mapa da Figura 37 [72].

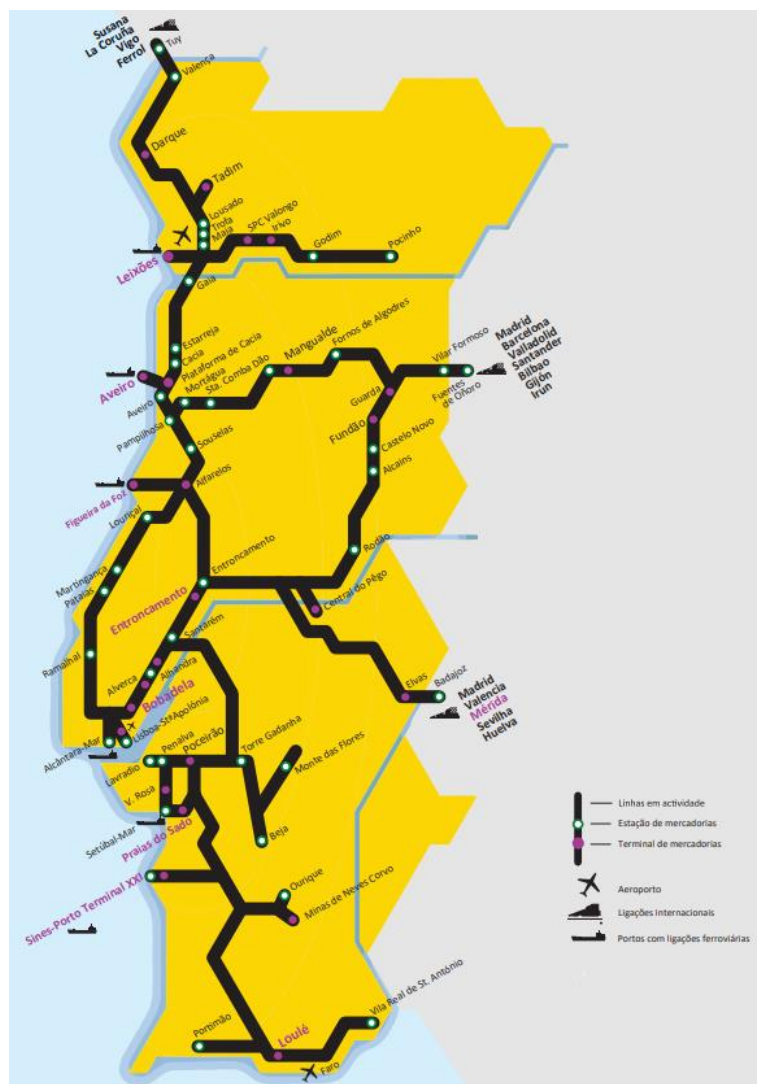


Figura 37 - Estações e Terminais de mercadorias ferroviários em Portugal [73]

Para se definir a rota que o comboio de mercadorias irá realizar recorreu-se ao diretório da rede ferroviária, onde é ilustrado as distâncias entre pontos e os troços de rede eletrificada, de acordo com a Figura 38 [74], [75].

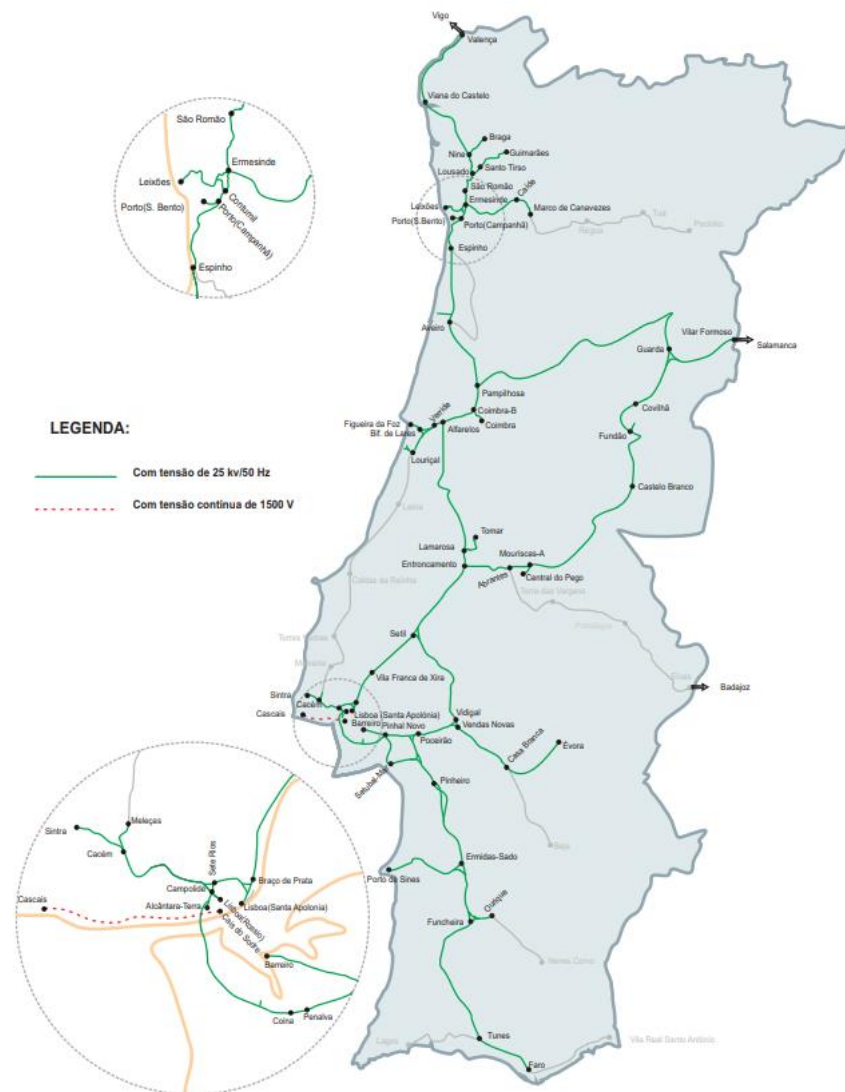


Figura 38 - Troço de rede eletrificada em Portugal [58]

A partir da Figura 38 é possível verificar-se toda a rede eletrificada em Portugal, desta maneira planejar as rotas possíveis de serem realizados por uma locomotiva elétrica. Já a Figura 39 ilustra o tipo de via instalada (única, dupla ou múltipla) e a distância entre pontos de interesse da rede ferroviária.

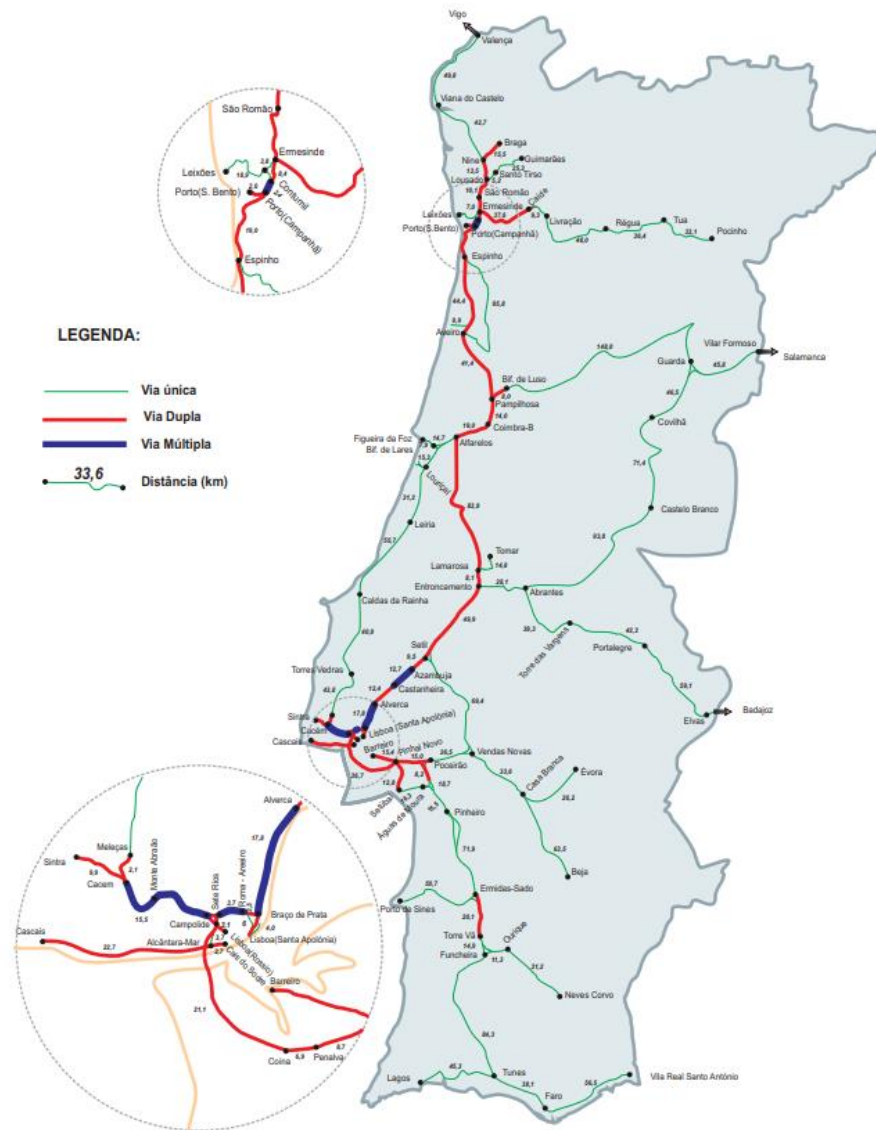


Figura 39 - Distância entre troços da rede em Portugal [58]

Com o auxílio das Figura 37, Figura 38, Figura 39 acima foi possível criar os trajetos o mais realista e detalhados possíveis com as partidas e paragens planeadas em locais específicos e a distância total percorrida de local a local, como o número exato de quilómetros bem definida.

### Planeamento da rota – Rodovia

O planeamento das rotas definidas para a rodovia, foram realizadas com a assistência do google maps e via Michelin, que tem a capacidade de planejar as rotas mais eficientes e rápidas até ao destino [76], [77]. Como definições utilizadas para planejar a viagem foi optado por não evitar autoestradas e o trajeto mais rápido, as Figura 40 e Figura 41 mostram o menu de opções dos programas. Como resultado do planeamento da viagem através destes programas é possível retirar a quantidade de quilómetros percorrida e o

tipo de estradas utilizadas, que irão ser úteis posteriormente para calcular o tempo total de viagem.

The image shows the 'Opções do trajeto' (Route Options) settings in Google Maps. It is divided into two columns. The left column, titled 'Evitar' (Avoid), has three unchecked checkboxes: 'Autoestradas' (Highways), 'Portagens' (Tolls), and 'Ferries'. The right column, titled 'Unidades de distância' (Distance units), has three radio buttons: 'Automático' (Automatic) is selected, 'milhas' (Miles), and 'km' (Kilometers).

Figura 40 - Definições utilizadas no google maps [61]

The image shows the 'AS MINHAS OPÇÕES DE ESTRADA' (My Road Options) settings in the Via Michelin app. It features two dropdown menus: 'Itinerário' (Itinerary) set to 'Rápido (tempo)' (Fast (time)) and 'Distância em' (Distance in) set to 'Quilómetros' (Kilometers). Below these are six radio button options: 'Nenhuma restrição' (No restrictions) is selected, followed by 'Evitar as autoestradas / vias rápidas' (Avoid highways / fast roads), 'Evitar as portagens' (Avoid tolls), 'Evitar as vinhetas (Suíça,...)' (Avoid vignettes (Switzerland,...)), 'Evitar as conexões marítimas' (Avoid maritime connections), and 'Evite sair do país' (Avoid leaving the country).

Figura 41 - Definições utilizadas no via Michelin [60]

### **Carga total transportada – Ferrovia e Rodovia**

O total de carga a ser transportada na rodovia foi estabelecida tendo em consideração aspetos como os parâmetros estabelecidos por lei para o máximo peso bruto de um veículo e a média da carga transportada numa viagem em Portugal e na UE.

Como referido anteriormente um conjunto veículo a motor mais um semireboque com três ou quatro eixos não deve apresentar um peso bruto superior, respetivamente, a 38 ou 44 toneladas [27]. Segundo os dados sobre o transporte rodoviário em 2021 apresentados na Figura 42, em Portugal, em média uma viagem nacional leva 12 toneladas de carga e uma viagem internacional leva 17,5 toneladas de carga, já a média na UE é de 13,6 toneladas para uma viagem nacional e 16 toneladas para uma viagem internacional.

Assim para o transporte rodoviário foi admitido que se iriam transportar 28 toneladas no total, mercadoria mais o peso do contentor, desta forma é possível maximizar a capacidade do veículo e ao mesmo tempo manter o peso bruto abaixo das 44 toneladas.

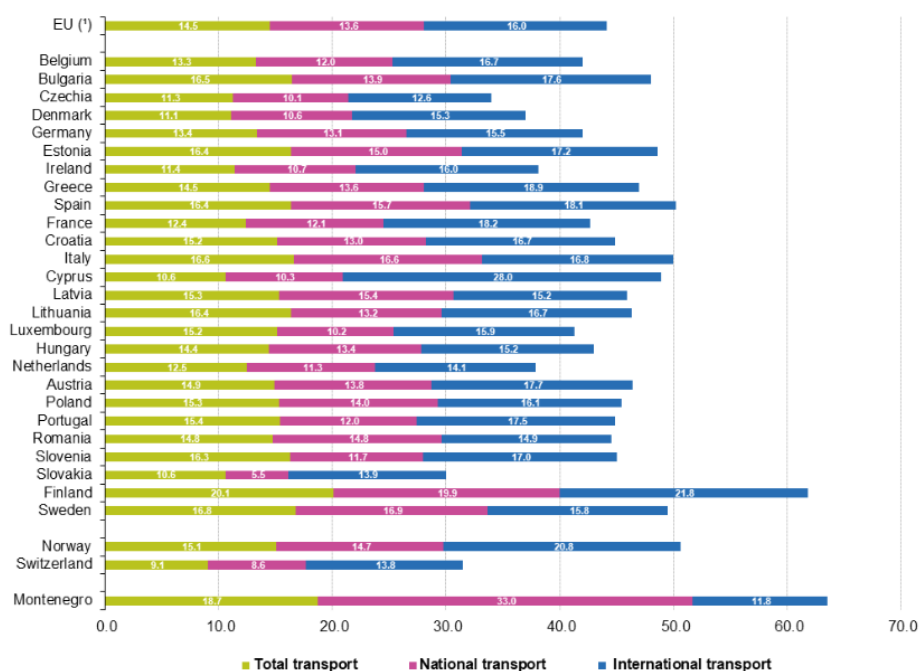


Figura 42 - Peso médio da carga transportada em transporte rodoviário em 2021 (toneladas) [78]

O total de carga a transportar pela ferrovia é estabelecido tendo em conta as dimensões e capacidade de carga do comboio, capacidade máxima de carga dos contentores e a máxima capacidade de carga sobre a linha férrea. A Figura 43 ilustra os pesos máximos permitidos por eixo e por unidade de comprimento na rede ferroviária portuguesa, sendo predominante 22,5 toneladas por eixo e 8 toneladas por metro.

Irá ser admitido que a carga tanto no transporte ferroviário como no transporte rodoviário será transportada em contentores de 20 pés. Cada contentor tem uma capacidade máxima para carga de 28 toneladas e uma tara de 2,5 toneladas [79]–[81]. É considerado que serão transportados 2 contentores de 20 pés em cada vagão, cada um com um peso bruto de 28 toneladas.

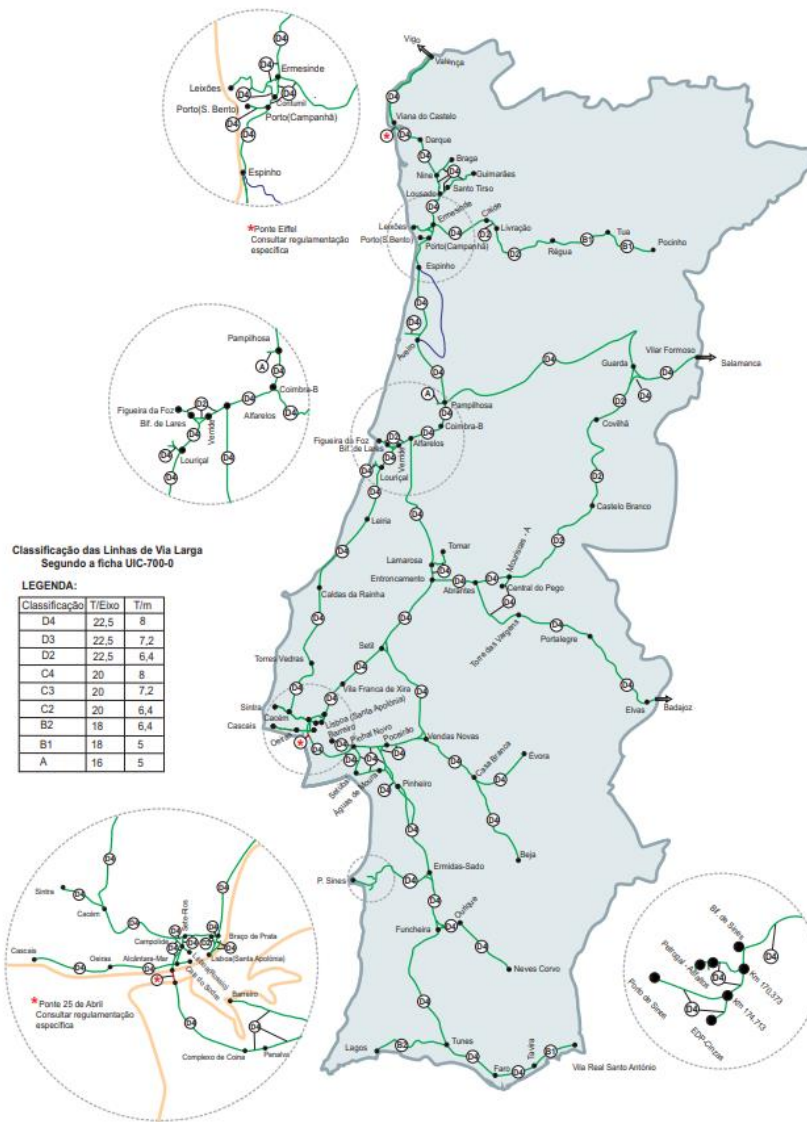


Figura 43 - Carga máxima permitida por linha [74]

### Cálculo da energia e tempo de viagem

A definição da rota e da carga transportada permite o cálculo da energia total despendida na viagem para os dois meios de transporte analisados. O cálculo da energia é realizado a partir do consumo específico do veículo, do peso bruto do veículo, contando com a carga transportada, e a distância percorrida. De acordo com a equação ((36):

$$E = C_e \times d \times p \quad (36)$$

$E$  – energia total gasta [MJ]

$C_e$  – consumo específico [ $MJ/km.ton$ ]

$d$  – distância percorrida [km]

$p$  – peso bruto do veículo (tara + carga) [ton]

A (36) permite calcular a energia total gasta numa viagem para toda a mercadoria transportada. No caso de se pretender apenas conhecer a incorporação energética de parte da mercadoria terá de se realizar o cálculo de outra forma. No transporte ferroviário o destino final de toda a carga não é o mesmo, logo a distância percorrida pode não ser a mesma e a energia gasta no transporte é diferente de carga para carga. Assim a incorporação da energia total de uma carga particular é dada pela equação ((37):

$$E_c = C_e \times d \times \left( \frac{p_c}{p_t} \times t + p_c \right) \quad (37)$$

$E_c$  – energia gasta por carga [MJ]

$p_c$  – peso da carga [ton]

$p_t$  – peso total da carga transportada com  $p_c$  [ton]

$t$  – tara do veículo [ton]

A emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera é obtida através de um fator de conversão a partir da energia utilizada para o transporte ferroviário, sendo este 45gCO<sub>2</sub>/MJ. Quanto ao transporte rodoviário é utilizada a fórmula das emissões específicas de CO<sub>2</sub> emitidas para um determinado combustível cuja fórmula química será C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>.

$$E_{CO_2} = E \times F_e \quad (38)$$

$E_{CO_2}$  – emissões de CO<sub>2</sub> [gCO<sub>2</sub>]

$F_e$  – fator de emissão [gCO<sub>2</sub>/MJ]

$$S_{CO_2} = \frac{44x}{12x + y + 16z} [kgCO_2/kgcombustível] \quad (39)$$

O combustível utilizado no transporte rodoviário é o diesel, cuja sua fórmula química mais comum é C<sub>12</sub>H<sub>23</sub> [82]. Para se obter a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por quantidade de energia gasta é necessário dividir a equação acima pela energia contida num quilograma de diesel, que neste caso é 45,8 MJ/kg combustível [83].

$$ER_{CO_2} = \frac{S_{CO_2}}{45,8} [kgCO_2/MJ] \quad (40)$$

O tempo de viagem é calculado através da distância percorrida e da velocidade média verificada durante a viagem. Enquanto na ferrovia é considerado que tanto em meio rural como urbano a velocidade de cruzeiro é constante, na rodovia não se sucede o mesmo. Dependendo do tipo de estrada percorrida a velocidade máxima permitida para os veículos de mercadorias varia, por essa razão ter-se-á de considerar o tipo de estradas

percorridas para o cálculo do tempo percorrido durante uma viagem. Assim o tempo de viagem será calculado para a rodovia e ferrovia segundo a equação ((41):

$$T_f = \frac{d}{v} \quad (41)$$

$T_f$  – tempo de viagem na ferrovia [h]

$d$  – distância percorrida [km]

$v$  – velocidade média [km/h]

O mesmo se sucede no cálculo do tempo de viagem para a rodovia, equação ((42), no entanto esta depende mais do tipo de estrada em que o veículo circula que apresentam diferentes limites de velocidade.

$$T_r = \frac{d_u}{v_u} + \frac{d_r}{v_r} + \frac{d_a}{v_a} \quad (42)$$

$T_r$  – tempo de viagem na rodovia [h]

$d_{u,r,a}$  – distância percorrida em meio urbano, rural ou autoestrada [km]

$v$  – velocidade média em meio urbano, rural ou autoestrada [km/h]

Com o auxílio das equações acima referidas e do método de abordagem escolhido para a avaliação e criação dos percursos, passa-se ao capítulo seguinte que pretende avaliar diferentes casos estudos e a influência de características específicas dos percursos.

### 3.2.Casos de estudo a abordar

No âmbito do estudo no qual se irá verificar qual o impacto da conciliação dos veículos ferroviário e rodoviário no transporte de mercadorias, apresentando-se os resultados obtidos através da criação de rotas as quais irão fornecer dados de consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> produzidos. De forma a perceber e quantificar a influência que a ferrovia possa ter no transporte de mercadorias foram criadas 4 rotas, ou seja, quatro casos de estudo com diferentes percursos e características. Assim os quatro casos resumem-se ao seguinte:

1. Caso de estudo I – um percurso do porto de Sines ao porto de Leixões, de interessante avaliação por apresentar a capacidade de ser totalmente realizado em ferrovia;

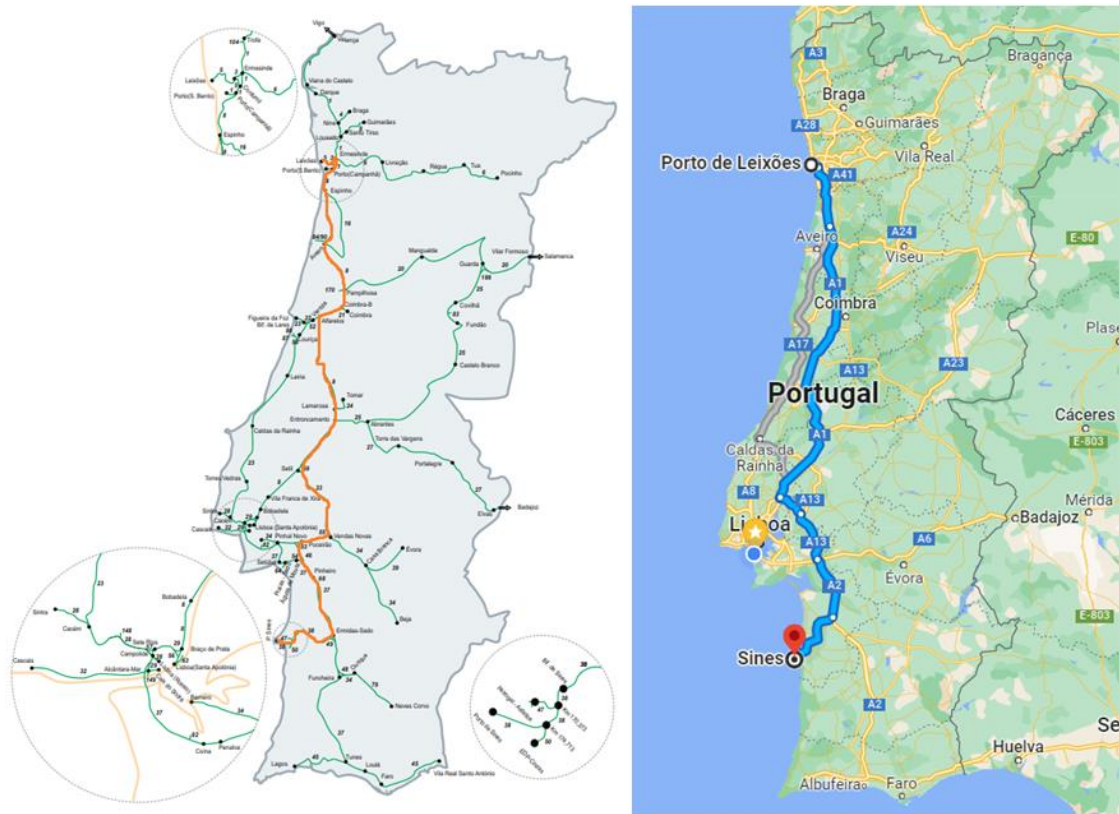


Figura 44 – Sines – Leixões, esquerda viagem em Ferrovia; direita viagem em Rodovia

2. Caso de estudo II – um percurso do porto de Lisboa até Bragança, apresenta a necessidade de o transporte rodoviário atuar, se este for realizado através de ferrovia, pois a atual rede férrea não chega até Bragança;

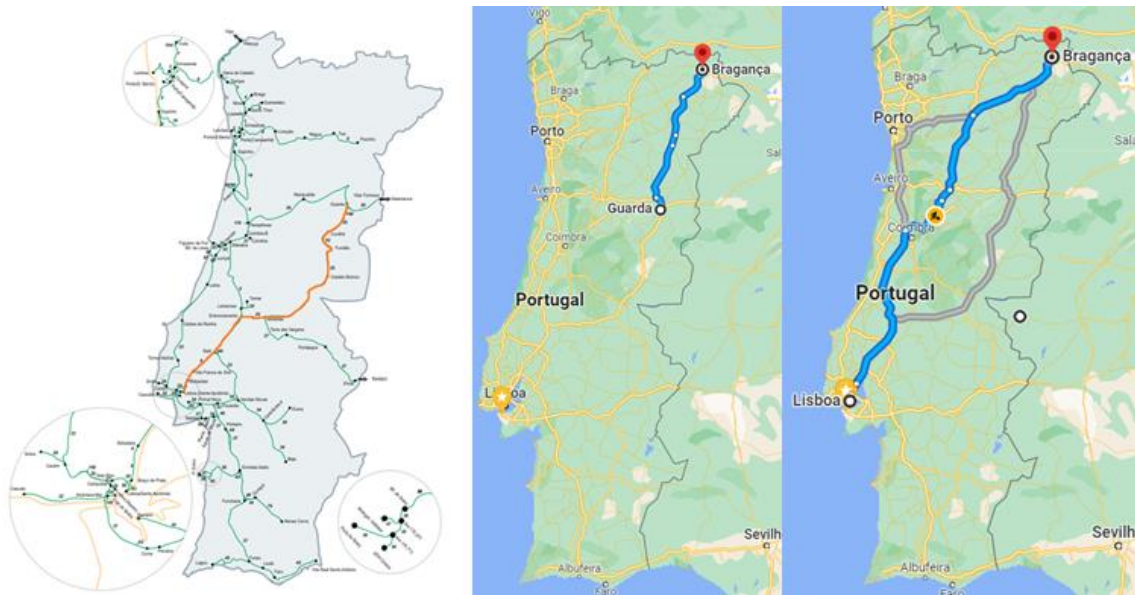


Figura 45 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda troço da Ferrovia; ao meio troço da Rodovia; à direita percurso do transporte Rodoviário entre Lisboa - Bragança,

3. Caso de estudo III – um percurso de Évora até Loulé, tal como no primeiro caso de estudo é também possível de realizar exclusivamente por ferrovia, no entanto este quando comparado com a rodovia acrescenta uma quantidade considerável de quilómetros percorridos;

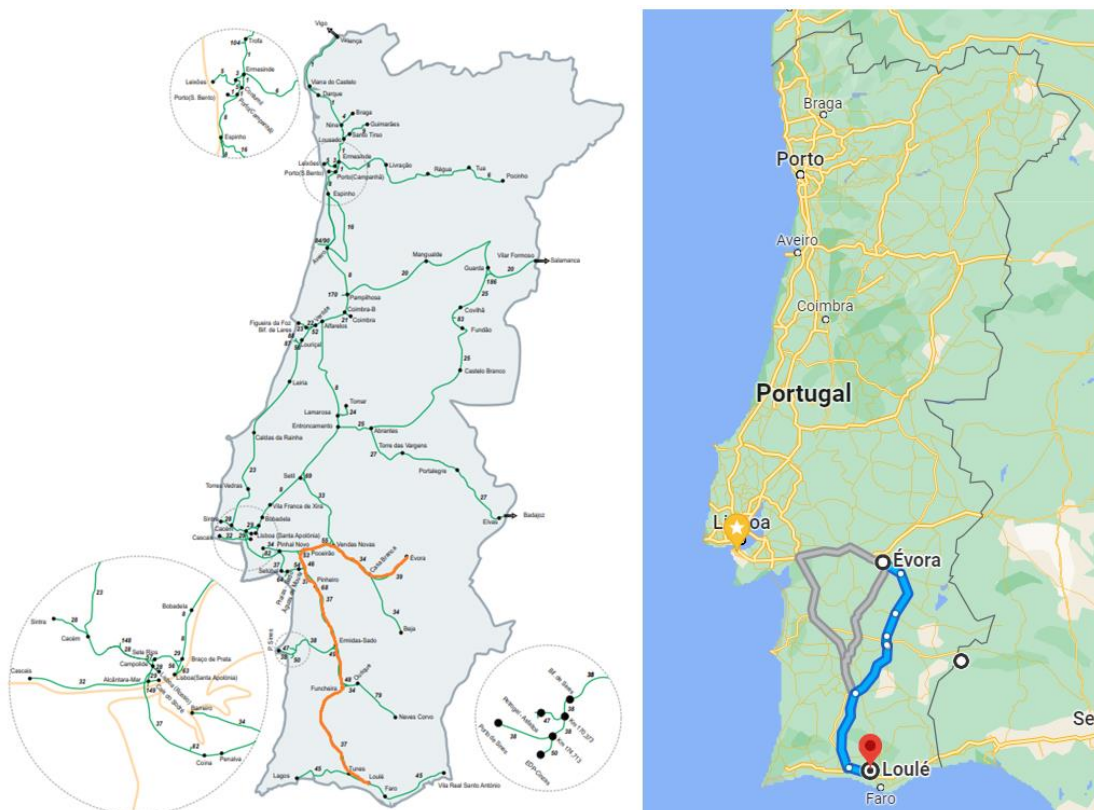


Figura 46 – Évora - Loulé, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda, Percurso do transporte rodoviário à direita

4. Caso de estudo IV – um percurso do porto de Sines até Elvas, onde neste momento se encontra em construção uma nova conexão através de Évora, o qual antes teria que ser realizado por Portalegre.

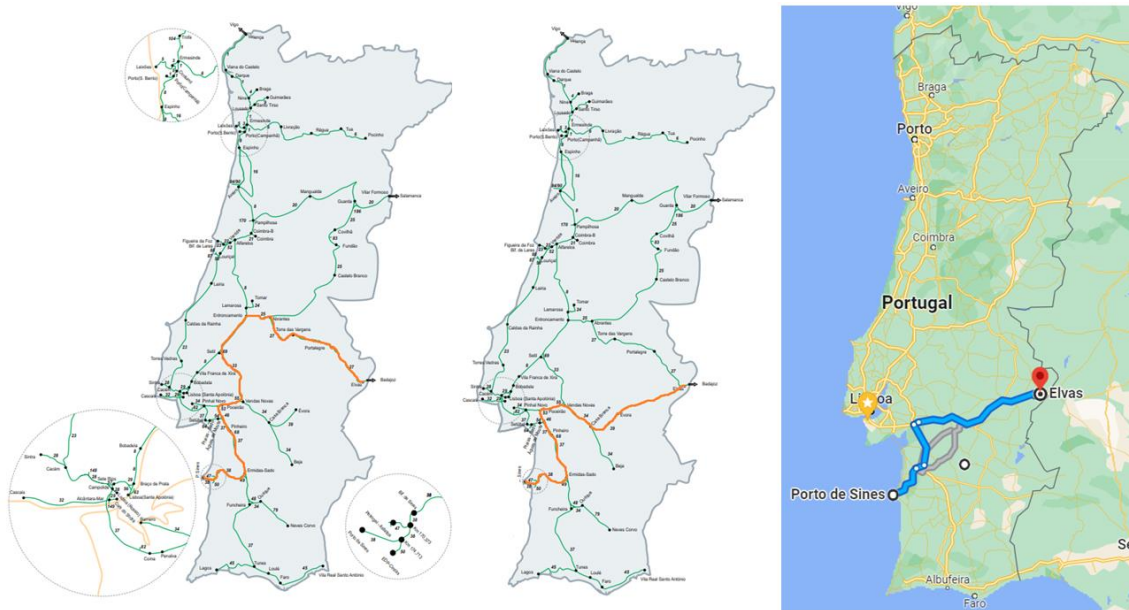


Figura 47 - Sines - Elvas, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda (Por Portalegre) e ao meio (Por Évora), à direita percurso do transporte Rodoviário entre Sines - Elvas

### 3.3. Mapas Energéticos e de Emissões

Nesta fase do trabalho é pretendido criar uma série de mapas que descrevam a energia consumida e as emissões emitidas para que o transporte de uma mercadoria chegue a vários destinos em Portugal continental partindo de um ponto do país. No início da construção dos mapas foram definidos quatro pontos do país que permitiriam criar uma maior percessão da energia gasta de norte a sul do país no transporte de mercadorias. Assim os quatro pontos de partida escolhidos foram: Lisboa, Porto, Sines e Faro.

Lisboa e Porto representam duas cidades portuguesas com o maior fluxo de pessoas, que por sua vez criam uma maior necessidade para o transporte de mercadorias a chegarem e a partir destes. Além disso, Lisboa e o Porto encontram-se em dois pontos do país que se localizam no centro e no norte do país e são considerados dois postos logísticos de grande importância para o país. Já Sines é uma cidade portuguesa onde se localiza um dos portos maiores portos do país e tal como Lisboa encontra-se mais a centro do país, enquanto Faro é uma cidade que se encontra a sul. A partir destes quatro pontos é possível ficar-se com um registo de como será a distribuição para todo país de diferentes pontos estratégicos, e os gastos energéticos e produção de CO<sub>2</sub> associados à mesma, e diferentes acessos a infraestruturas.

A partir destes quatro pontos é pretendido criar uma série de mapas que darão a uma melhor perspetiva dos gastos energéticos e as emissões associadas aos mesmos dos percursos realizados pelos dois meios de transporte em estudo. Assim os mapas que irão ser criados são os seguintes:

- Rodovia
  - Consumo energético por tonelada transportada [MJ/ton];
  - Emissões de CO<sub>2</sub> produzidas por tonelada transportada [kgCO<sub>2</sub>/ton];
  - Consumo energético de carga transportada num ano para um município [MJ];
  - Emissões de CO<sub>2</sub> produzidas por carga transportada num ano para um município [kgCO<sub>2</sub>];
- Ferrovia
  - Consumo energético por tonelada transportada [MJ/ton];
  - Emissões de CO<sub>2</sub> produzidas por tonelada transportada [kgCO<sub>2</sub>/ton];
  - Consumo energético de carga transportada num ano para um município [MJ];
  - Emissões de CO<sub>2</sub> produzidas por carga transportada num ano para um município [kgCO<sub>2</sub>];

### Procedimento para a criação do mapas

A primeira etapa para o começo da construção dos mapas é definir a distância total percorrida desde os pontos de partida escolhidos até cada um dos municípios em Portugal continental. A distância percorrida pela rodovia até ao destino final foi definida com a ajuda da ferramenta google maps para se obter o trajeto mais rápido. Os trajetos da ferrovia já foram traçados tal como realizado anteriormente nos casos de estudo, com a ajuda dos mapas das Figura 37 e Figura 39, e também com a ajuda do google maps para definir os trajetos finais concretizados em rodovia que não eram possíveis de ser finalizados pela rede férrea. Na conceção dos trajetos ferroviários, teve-se em conta as rotas mais eficientes e que iriam tornar o tempo de viagem até ao destino o mais curto possível, assim como a distância percorrida nos dois meios de transporte.

A Tabela 16 ilustra um exemplo de como foi realizado a determinação da distância entre dois pontos, tanto na rodovia e na ferrovia.

Tabela 16 – Exemplo da distância percorrida até destino final em trajeto de ferrovia e rodovia

Destino	Ferrovia				Distância Rodovia [km]	Rodovia			
	Distância Ferrovia [km]					Distância [km]			
	Lisboa	Porto	Sines	Faro		Lisboa	Porto	Sines	Faro
Abrantes	134,4	257,9	315,2	421,9	0	145	236	261	380
Águeda	272,7	63,4	498,2	604,6	25,7	258	78,3	374	493
Aguiar da Beira	309,3	182,8	490,1	596,8	35,4	334	165	452	571
Alandroal	185,6	408,9	297	403,7	53,4	193	362	199	260
Albergaria-a-Velha	278,7	69,4	459,5	566,2	15,1	266	67,1	383	501
Albufeira	384,5	607,8	192,3	15,8	27,5	256	529	157	40,8

Após definida a distância necessária percorrer até aos diferentes destinos, procede-se ao cálculo dos consumos energéticos em três cenários diferentes tal como realizado para os casos de estudo anteriores. Estes três cenários permitem estabelecer uma visão mais pessimista ou mais otimista em relação aos dados adquiridos para o consumo dos veículos estudados.

Ao dos casos de estudo anteriores em que os percursos ferroviários estudados eram todos baseados em trajetos eletrificados, neste estudo utilizou-se todos os caminhos férreos capazes de serem utilizados para transporte de mercadorias, sejam estes eletrificados ou não. Deste modo, procedeu-se à aquisição de dados do consumo de locomotivas a diesel e diesel-elétricas de forma que seja aplicado a estes troços do trajeto que não sejam eletrificados.

Tabela 17 - Consumos de locomotivas diesel e diesel-elétricas

Consumo	Unidade	Carga	Unidade	Fonte
0,21	MJ/ton.km	1715	ton	[58]
0,2	MJ/ton.km	2058	ton	[58]
0,19	MJ/ton.km	2352	ton	[58]
0,43	MJ/ton.km	945	ton	[58]
0,38	MJ/ton.km	1134	ton	[58]
0,35	MJ/ton.km	1296	ton	[58]
0,193	MJ/ton.km	1940	ton	[58]
0,183	MJ/ton.km	2485	ton	[58]
0,3636	MJ/ton.km	765	ton	[56]
0,65	MJ/ton.km			[54]
0,76	MJ/ton.km			[54]
0,608	MJ/ton.km			[54]
0,12	MJ/ton.km			[52]

Aplicando a mesma metodologia da análise do boxplot ao conjunto de dados da Tabela 17, obtém os três cenários pretendidos para este conjunto de dados onde se sucede o mesmo dos dados anteriores com o limite inferior que assume um valor negativo que não é representativo para este tipo de estudo.

Tabela 18 - Valores representativos dos cenários assumidos para o meio de transporte ferroviário com locomotivas a diesel e diesel-elétricas

Cenário	Valores Boxplot	Transporte Ferroviário Diesel e Diesel-Elétrico
	Limite Inferior	- 0,2998
Otimista	1º Quartil	0,1915
Médio	Mediana/2º Quartil	0,3500
Pessimista	3º Quartil	0,5190
	Limite Superior	1,0103

A quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> emitidas por uma locomotiva diesel ou diesel-elétrica, é determinada através da mesma equação usada para a rodovia, pois esta equação calcula as emissões produzidas pela queima de um combustível e não pelo tipo de veículo.

A partir dos dados acima recolhidos e das equações para a determinação da energia e da quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> emitidas, foram definidos os valores envolvidos nos trajetos a partir dos quatro pontos escolhidos, Lisboa, Porto, Sines e Faro. Nos primeiros mapas apenas se obtém a energia e as emissões gastas e produzidas por tonelada de mercadoria transportada, pelo que não se multiplicou nas equações utilizadas a quantidade de mercadoria transportada.

Na criação dos mapas ferroviários é de notar que a equação da energia gasta e das respetivas emissões produzidas houve um cálculo mais complexo em que se teve de contar com a energia gasta na porção da distância percorrida pela ferrovia e pela rodovia, de acordo com a equação (43):

$$E_{Total\ Ferrovia} = E_{ferrovia} + E_{Rodovia} \quad (43)$$

Os mapas foram todos produzidos com a assistência das ferramentas para a criação de mapas com informação do website Datawrapper [84].

### 3.4. Mapas Energéticos e de Emissões por tonelada transportada

Estes mapas representam a energia média gasta e as respetivas emissões produzidas por tonelada de mercadoria transportada desde os pontos de partida até aos restantes municípios. Com estes mapas é criado uma linearidade dos dados, pois estes apenas variam com a distância, sendo evidente que quanto mais longínquo o destino mais energia é consumida. Este efeito é mais notável nos mapas do transporte rodoviário. No entanto é notável nos mapas criados para a ferrovia que em alguns locais que se localizam a uma distância mais reduzida em relação a outros apresentam maiores necessidades energética para deslocar a mercadoria até ao respetivo local, isto deve-se há necessidade de uma maior intervenção do transporte rodoviário para a mercadoria chegar ao destino final.

### 3.5. Mapas Energéticos e de Emissões

Com a criação dos mapas pretende-se verificar a energia necessária a utilizar no transporte de mercadorias a partir de um ponto do país até aos restantes municípios. Serão criados dois tipo de mapas, um em que se determina a energia necessária por tonelada de mercadoria transportada e um segundo onde se calcula a energia total utilizada durante um ano no transporte até ao município, de forma a identificarem-se os pontos onde será possível haver uma mudança ou incentivo para o uso do transporte ferroviário com maior frequência.

Segundo a fonte [85] em 2021 foram transportadas em Portugal 162,3 milhões de toneladas de mercadoria através do transporte rodoviário, onde no mesmo ano em Portugal continental residiam 9.917.279 milhões de pessoas, distribuídas pelo país conforme mostrado na Figura 48 [86]. Utilizando os valores dos mapas criados anteriormente com os dados introduzidos acima foi possível criar mapas mais detalhados com a distribuição da mercadoria movimentada em Portugal por pessoa, tendo sido determinado que cada por cada pessoa foram transportadas 16,365 toneladas em 2021.

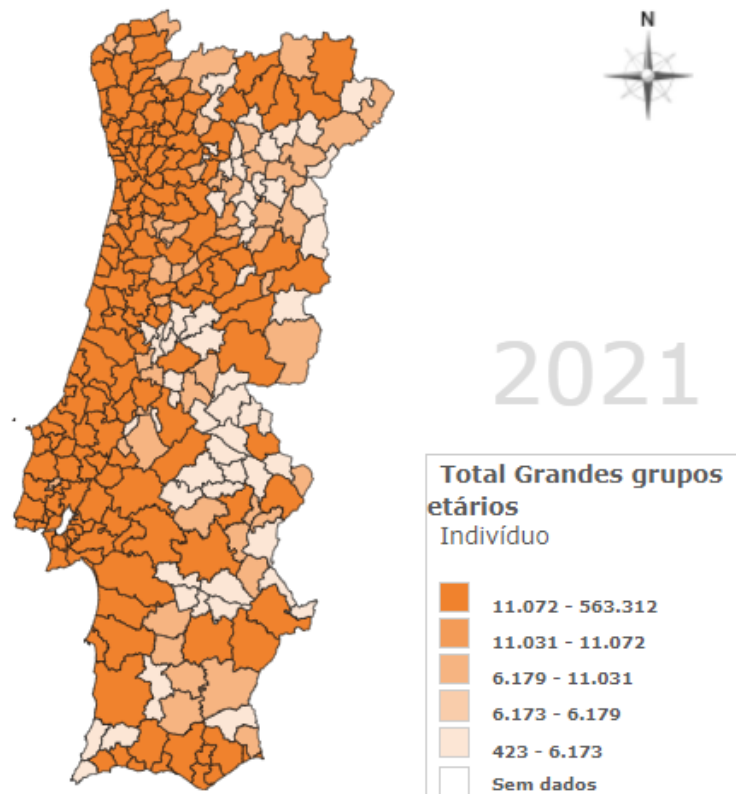


Figura 48 - População residente em Portugal Continental em 2021 [86]

Aplicando o valor acima calculado pela população residente em cada município estima-se a quantidade de mercadoria transportada para o mesmo, e a partir deste a energia total gasta no transporte rodoviário e também a energia gasta no transporte ferroviário. Um pressuposto que se está a assumir para cada mapa criado e que não corresponde á realidade é o facto de se assumir que toda a mercadoria a circular pelo país apenas se apresenta a sair de um dos pontos escolhidos para análise. A determinação da quantidade de mercadoria destinada a cada município no ano de 2021 é dada pela equação (44):

$$MT [ton] = 16,365 [ton/residentes] \times N^{\circ}residentes \text{ no município} \quad (44)$$

## 4. Resultados

### 4.1. Caso de estudo I

O primeiro caso de estudo é uma rota que começa no porto de Sines e acaba no porto de Leixões. A principal característica desta rota é a disponibilidade de a mesma poder ser realizada exclusivamente através de transporte ferroviário. Desta forma é possível comparar diretamente os dois modos de transporte uma vez que no transporte ferroviário não existe a intervenção do modo rodoviário.

Neste caso estudo irão ser feitas apenas duas viagens, uma através da ferrovia e a outra através da rodovia. A viagem em ferrovia começa em Sines e acaba em Leixões sem a intervenção do transporte rodoviário, e vice-versa, sucedendo-se o mesmo na viagem em rodovia.

A Tabela 19 apresenta os detalhes das viagens realizadas na ferrovia e na rodovia, como os quilómetros percorridos e a velocidade praticada nos troços e a carga total transportada. É de notar que o transporte ferroviário irá percorrer mais 103 km que o transporte rodoviário. A Figura 49 apresenta as rotas realizadas pelos dois meios de transporte.

Tabela 19 - Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo I

Rota		Carga Transportada			Distância Percorrida e Velocidade máxima praticada						
Origem	Destino	Tara [kg]	Carga [kg]	Total [kg]	Urbano [km]	Vel. [km/h]	Rural [km]	Vel. [km/h]	Autoestrada [km]	Vel. [km/h]	Total [km]
Ferrovia											
Sines	Leixões	448	896	1344	27,3	90	516,9	90	-	-	544,2
Rodovia											
Sines	Leixões	13	28	41	7	50	-	-	434	90	441

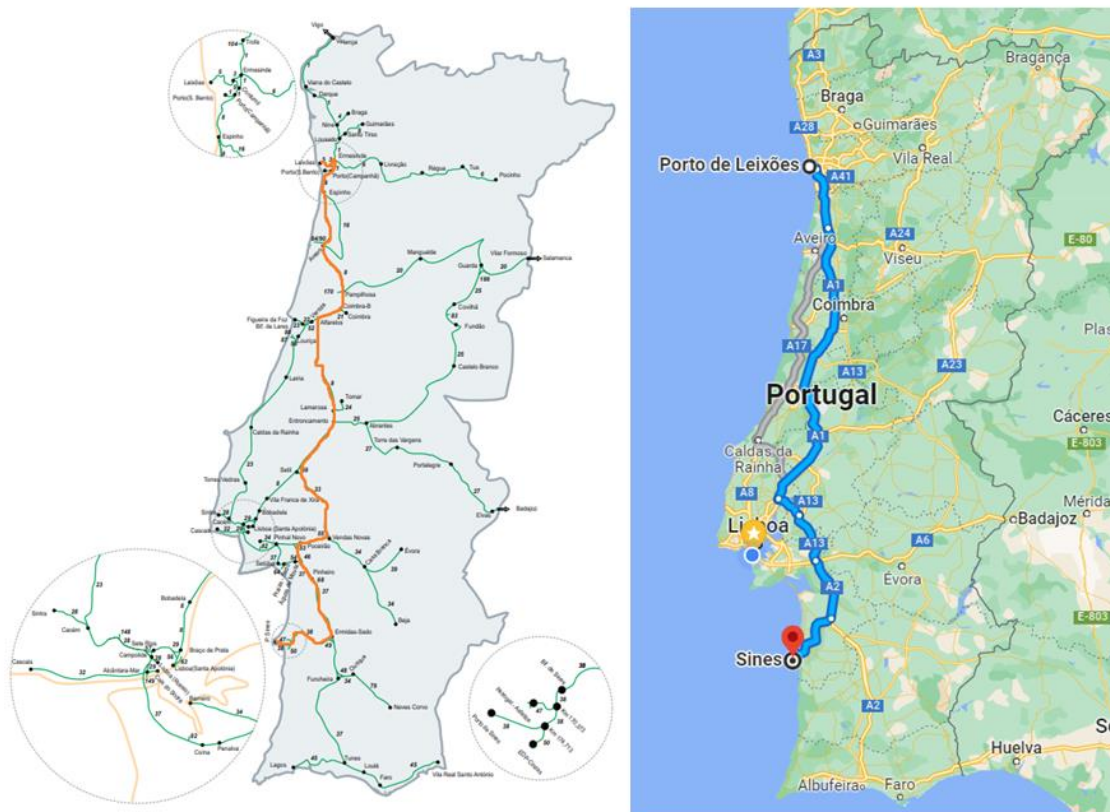


Figura 49 – Sines – Leixões, esquerda viagem em Ferrovia; direita viagem em Rodovia

A Tabela 20 e Tabela 21 mostram os resultados provenientes da análise do caso de estudo. É possível verificar que o nível de gastos energéticos e de emissões do transporte ferroviário é muito superior ao do transporte rodoviário em todos os cenários, no entanto este transporta 32 vezes mais carga. Se se fizer a divisão dos gastos energéticos e da emissão de gases do transporte ferroviário por contentor, apura-se que existe uma diminuição da intensidade energética de 32 vezes (número de contentores transportados). Os valores por contentor da ferrovia quando comparados com o transporte rodoviário que se considera que transporta o mesmo contentor averigua-se que este é 6,28, 6,92 ou 6,61 vezes menores consoante o cenário considerado.

Tabela 20 - Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo I

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> TTW [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	Total	Por Contentor
<b>Ferrovia</b>								
Otimista	0,3	5,74	-	6,05	64417,75	2013,05	2699,10	84,35
Médio					117024,77	3657,02	4903,34	153,23
Pessimista					226735,49	7085,48	9500,22	296,88

Tabela 21- Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo I

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	TTW	WTW
Rodovia								
Otimista	0,14	0	4,82	4,96	12638,53	12638,53	872,47	1137,47
Médio					25313,40	25313,40	1747,44	2278,21
Pessimista					46829,79	46829,79	3232,77	4214,68

O mesmo se sucede com a emissão de CO<sub>2</sub> que se encontra diretamente ligada com os gastos energéticos, apresentando por contentor uma diminuição de 32 vezes em relação ao total gasto na viagem na ferrovia e uma diminuição 10,34, 11,40 ou 10,89 vezes, consoante o cenário considerado, quando comparado com o total emitido no transporte rodoviário. Os valores usados para a comparação das emissões de CO<sub>2</sub> são os valores TTW, a utilização dos valores TTW para a comparação seriam muito superiores aos obtidos, porque no caso da ferrovia (neste estudo são consideradas locomotivas elétricas) as emissões em TTW seriam iguais a 0, pois o uso de eletricidade não produz emissões adicionais à sua produção, ao contrário do que acontece com o diesel.

O tempo de viagem despendido entre os dois modos apresenta uma diferença de apenas 1 hora. Esta disparidade deve-se ao facto de na ferrovia se ter que percorrer mais 100 km, caso contrário uma vez que as velocidades praticadas nos dois meios de transporte são semelhantes o tempo decorrido seria semelhante ao da rodovia.

Convertendo a energia total utilizada na viagem de rodovia de megajoule para litros por cada 100 quilómetros, obtém-se para o cenário otimista, médio e pessimista os seguintes resultados: 76 l/100km, 156 l/100km e 279 l/100km. Dos resultados obtidos, o que se apresenta mais coerente é o cenário otimista, pois os restantes valores apresentam-se elevados para o que é normalmente relatado no sector nacional do transporte de mercadorias. Estes resultados verificam-se devido aos valores bibliográficos utilizados, a partir de fontes que apresentam várias combinações de veículo e sistema de propulsão e que forma adaptados ao caso nacional. Adicionalmente, em certos casos não foi possível identificar o peso transportado, o que poderá estar a contribuir para sobre-dimensionar o consumo de combustível. Esta constatação estende-se aos restantes casos de estudo associados à rodovia.

## 4.2.Caso de estudo II

O segundo caso de estudo é uma rota que começa no porto de Lisboa e acaba em Bragança. A principal característica desta rota é a indisponibilidade de a mesma poder ser realizada exclusivamente através de transporte ferroviário. Desta forma é necessário que haja a intervenção do transporte rodoviário para que a carga chegue ao destino, assim é possível verificar a influência do uso dos dois meios de transporte. Esta rota irá permitir comparar o quanto a introdução do transporte rodoviário influencia a viagem e o que acontecerá à eficiência do uso da ferrovia na comparação direta com o transporte rodoviário.

Neste caso estudo irão ser feitas duas viagens, uma através da ferrovia e a outra através da rodovia. A viagem em ferrovia começa em Lisboa e acaba na Guarda, onde posteriormente será acabada por transporte rodoviário que irá da Guarda até Bragança. A segunda viagem realizada na rodovia começa em Lisboa e acaba em Bragança, esta ao contrário da ferrovia é direta o que permite poupar algum tempo em intermodalidade.

A Tabela 22 e Tabela 19 apresenta os detalhes das viagens realizadas na ferrovia e na rodovia, como os quilómetros percorridos e a velocidade praticada nos troços e a carga total transportada. É de notar que o transporte ferroviário irá percorrer 346 km na ferrovia e 175 km na rodovia (521 km no total) o correspondente a cerca de 34% do total do percurso planeado. O transporte rodoviário irá percorrer 484 km apenas menos 37,1 km que o percurso da ferrovia. A Figura 50 e Figura 51 apresentam as rotas realizadas pelos dois meios de transporte.

Tabela 22- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo II

Rota		Carga Transportada			Distância Percorrida e Velocidade máxima praticada						
Origem	Destino	Tara [kg]	Carga [kg]	Total [kg]	Urbano [km]	Vel. [km/h]	Rural [km]	Vel. [km/h]	Autoestrada [km]	Vel. [km/h]	Total [km]
Ferrovia											
Lisboa	Guarda	448	896	1344	21,8	90	324,3	90	-	-	346,1
Guarda	Bragança	13	28	41	10	50	120	80	45	90	175
Rodovia											
Lisboa	Bragança	13	28	41	17	50	273	80	194	90	484



Figura 50 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda troço da Ferrovia; à direita troço da Rodovia

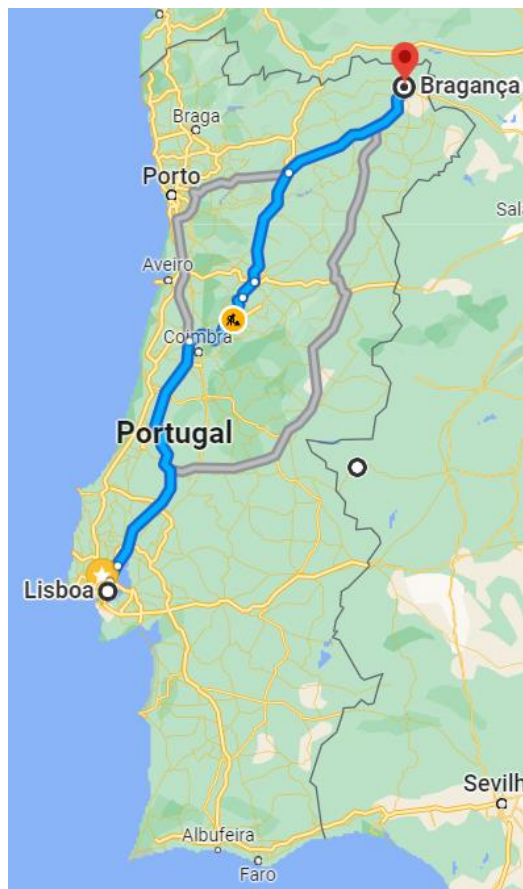


Figura 51 - Lisboa - Bragança, Percurso do transporte Rodoviário

As Tabela 23 e Tabela 24 mostram os resultados provenientes da análise do caso de estudo. É possível verificar que o nível de gastos energéticos e de emissões do transporte ferroviário é muito superior ao do transporte rodoviário em todos os cenários, no entanto este transporta 32 vezes mais carga. Se se fizer a divisão dos gastos energéticos e da emissão de gases do transporte ferroviário por contentor, apura-se que existe uma diminuição da intensidade energética de 32 vezes (número de contentores transportados). Os valores por contentor da ferrovia quando comparados com o transporte rodoviário que se considera que transporta o mesmo contentor averigua-se que este é 2,20, 2,25 ou 2,23 vezes menores consoante o cenário considerado.

Tabela 23 - Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo II

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	Total	Por Contentor
Ferrovia – 346 km								
Otimista	0,24	3,60	-	3,85	40968,36	1280,26	1716,57	53,64
Médio					74425,34	2325,79	3118,42	97,45
Pessimista					144199,10	4506,22	6041,94	188,81
Rodovia – 175 km								
Otimista	0,20	1,50	0,50	2,20	5015,29	5015,29	360,38	451,38
Médio					10045,00	10045,00	721,80	904,05
Pessimista					18583,25	18583,25	1335,32	1672,49
Total por Contentor								
Otimista	0,44	5,1	0,5	6,05	6295,55	-	414,02	-
Médio					12370,79	-	819,25	-
Pessimista					23089,47	-	1524,13	-

Tabela 24- Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo II

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	TTW	WTW
Rodovia								
Otimista	0,34	3,41	2,16	5,91	13870,86	13870,86	957,54	1248,38
Médio					27781,60	27781,60	1917,83	2500,34
Pessimista					51395,96	51395,96	3547,98	4625,64

O mesmo se sucede com a emissão de CO<sub>2</sub> que se encontra diretamente ligada com os gastos energéticos, apresentando por contentor uma diminuição de 32 vezes em relação ao total gasto na viagem na ferrovia e uma diminuição 2,39, 2,42 ou 2,41 vezes, consoante o cenário considerado, quando comparado com o total emitido no transporte rodoviário. Da comparação deste caso de estudo com o primeiro retira-se uma conclusão de que a intervenção do transporte rodoviário na viagem realizada pela ferrovia diminui a diferença entre o transporte puramente rodoviário e o ferroviário, porém esta diferença continua a ser considerável. O tempo de viagem em ambos os percursos são similares, no entanto há que ter em conta o tempo para transferir o contentor do comboio para um dos camiões.

Convertendo a energia total utilizada na viagem de rodovia de megajoule para litros por cada 100 quilómetros, obtemos para o cenário otimista, médio e pessimista os seguintes resultados: 76 l/100km, 166 l/100km e 306 l/100km. Dos resultados obtidos, o que se apresenta mais coerente é o cenário otimista.

### 4.3.Caso de estudo III

O terceiro caso de estudo é uma rota que começa em Évora e acaba em Loulé. A principal característica desta rota é considerar-se que a carga não se encontra na estação/terminal de mercadorias da ferrovia, daí haver a necessidade de o levar até ao local. No entanto a rota tal como no caso de estudo I pode ser realizada exclusivamente através de transporte ferroviário, assim é possível verificar a influência “last mile” no início da viagem num percurso que feito por transporte rodoviário é mais direto. Esta rota irá permitir comparar o quanto a introdução do transporte rodoviário influenciar a viagem e o que acontecerá à eficiência do uso da ferrovia na comparação direta com o transporte rodoviário.

Neste caso estudo irão ser feitas duas viagens, uma através da ferrovia e a outra através da rodovia. A viagem em ferrovia começa algures em Évora com o transporte rodoviário até à estação e acaba em Loulé. A segunda viagem realizada na rodovia começa em Évora e acaba em Loulé, esta ao contrário da ferrovia é mais direta o que permite poupar algum tempo de viagem.

A Tabela 25 e Tabela 19 apresenta os detalhes das viagens realizadas na ferrovia e na rodovia, como os quilómetros percorridos e a velocidade praticada nos troços e a carga total transportada. É de notar que o transporte ferroviário irá percorrer 320 km na ferrovia e 30 km na rodovia (350 km no total) o correspondente a cerca de 9% do total do percurso planeado. O transporte rodoviário irá percorrer 214 km, ou seja, menos 136,25 km que o percurso da ferrovia. A Figura 52 apresenta as rotas realizadas pelos dois meios de transporte.

Tabela 25- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo III

Rota		Carga Transportada			Distância Percorrida e Velocidade máxima praticada						
Origem	Destino	Tara [kg]	Carga [kg]	Total [kg]	Urbano [km]	Vel. [km/h]	Rural [km]	Vel. [km/h]	Autoestrada [km]	Vel. [km/h]	Total [km]
Ferrovia											
Évora	Loulé	448	896	1344	19,05	90	301,2	90	-	-	320,25
Évora	Évora	13	28	41	10	50	20	80	-	-	30
Rodovia											
Lisboa	Bragança	13	28	41	5	50	130	80	79	90	214



Figura 52 – Évora - Loulé, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda, Percurso do transporte rodoviário à direita

A Tabela 26 e Tabela 27 mostram os resultados provenientes da análise do caso de estudo. É possível verificar que o nível de gastos energéticos e de emissões do transporte ferroviário continua a ser muito superior ao do transporte rodoviário em todos os cenários,

no entanto este transporta 32 vezes mais carga. Se se fizer a divisão dos gastos energéticos e da emissão de gases do transporte ferroviário por contentor, apura-se que existe uma diminuição da intensidade energética de 32 vezes (número de contentores transportados). Os valores por contentor da ferrovia quando comparados com o transporte rodoviário que se considera que transporta o mesmo contentor averigua-se que este é 3,00, 3,17 ou 3,09 vezes menores consoante o cenário considerado.

Tabela 26 - Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo III

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	Total	Por Contentor
Ferrovia								
Otimista	0,21	3,35	-	3,56	37908,46	1184,64	1588,36	49,64
Médio					68866,56	2152,08	2885,51	90,17
Pessimista					133428,96	4169,66	5590,67	174,71
Rodovia								
Otimista	0,20	0,25	-	0,45	859,76	859,76	61,78	61,78
Médio					1722,00	1722,00	123,74	123,74
Pessimista					3185,70	3185,70	228,91	228,91
Total por Contentor								
Otimista	0,41	3,6	-	4,01	2044,40	-	111,42	-
Médio					3874,08	-	213,91	-
Pessimista					7355,36	-	403,62	-

Tabela 27- Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo III

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	TTW	WTW
Rodovia								
Otimista	0,1	1,63	0,88	2,6	6132,98	6132,98	423,37	551,97
Médio					12283,60	12283,60	847,96	1105,52
Pessimista					22724,66	22724,66	1568,73	2045,22

O mesmo se sucede com a emissão de CO<sub>2</sub> que se encontra diretamente ligada com os gastos energéticos, apresentando por contentor uma diminuição de 32 vezes em relação ao total gasto na viagem na ferrovia e uma diminuição 3,88, 4,06 ou 3,98 vezes, consoante o cenário considerado, quando comparado com o total emitido no transporte rodoviário.

Este caso de estudo inclui os dois cenários dos casos anteriores, em que a ferrovia necessita da intervenção de um camião para o transporte até à estação e ao mesmo tempo ainda percorre mais quilómetros. Por sua vez apesar do maior desvio na rota continua a haver um menor uso de energia considerável e o mesmo se sucede com as emissões. Neste estudo o uso do transporte rodoviário não tem tanto impacto como no segundo caso de estudo. O tempo de viagem neste caso já tem uma diferença considerável, cerca de 1 hora e 30 minutos, e ainda se terá que ter em conta o tempo para o carregamento da carga no comboio.

Convertendo a energia total utilizada na viagem de rodovia de megajoule para litros por cada 100 quilómetros, obtemos para o cenário otimista, médio e pessimista os seguintes resultados: 76 l/100km, 151 l/100km e 279 l/100km. Dos resultados obtidos, o que se apresenta mais coerente é o cenário otimista.

#### 4.4.Caso de estudo IV

O quarto caso de estudo é uma rota que começa no porto de Sines e acaba na fronteira em Elvas. A principal característica desta rota é verificar os ganhos da existência num futuro próximo de uma nova rota ferroviária eletrificada. Por enquanto a rota existente apresenta-se mais longa e a mesma não se encontra eletrificada. A mesma rota tal como no caso de estudo I pode ser realizada exclusivamente através de transporte ferroviário, embora o percurso feito pelo transporte rodoviário é mais direto. Esta rota irá permitir comparar os ganhos relativos ao transporte rodoviário da introdução de uma nova alternativa ferroviária, verificando o que acontecerá à eficiência e emissões associadas ao uso da ferrovia e da rodovia.

Neste caso estudo irão ser feitas três viagens, Figura 53, duas através da ferrovia e a outra através da rodovia. A viagem em ferrovia começa no porto de Sines e acaba em Elvas, passando por Portalegre. A segunda viagem de ferrovia começa e acaba nos mesmo locais, contudo em vez de passar por Portalegre passa por Évora. A viagem realizada na rodovia começa também no porto de Sines e acaba em Elvas, esta ao contrário da ferrovia é mais direta o que permite poupar tempo de viagem.

A Tabela 28 e Tabela 19 apresenta os detalhes das viagens realizadas na ferrovia e na rodovia, como os quilómetros percorridos e a velocidade praticada nos troços e a carga total transportada. É de notar que o transporte ferroviário irá percorrer 396 km na ferrovia no percurso por Portalegre e 308 km no percurso que passa por Évora, menos 88 km. O transporte rodoviário irá percorrer 246 km, ou seja, menos 150 km que o primeiro percurso e apenas menos 62 km que o segundo percurso da ferrovia. A Figura 53 apresenta as rotas realizadas pelos dois meios de transporte.

Tabela 28- Distância percorrida e carga transportada, Caso de estudo IV

Rota		Carga Transportada			Distância Percorrida e Velocidade máxima praticada						
Origem	Destino	Tara [kg]	Carga [kg]	Total [kg]	Urbano [km]	Vel. [km/h]	Rural [km]	Vel. [km/h]	Autoestrada [km]	Vel. [km/h]	Total [km]
Ferrovia por Portalegre											
Sines	Elvas	448	896	1344	0	90	396	90	-	-	396
Ferrovia por Évora											
Sines	Elvas	448	896	1344	0	90	307,6	90	-	-	307,6
Rodovia											
Lisboa	Bragança	13	28	41	9	50	6	80	231	90	246

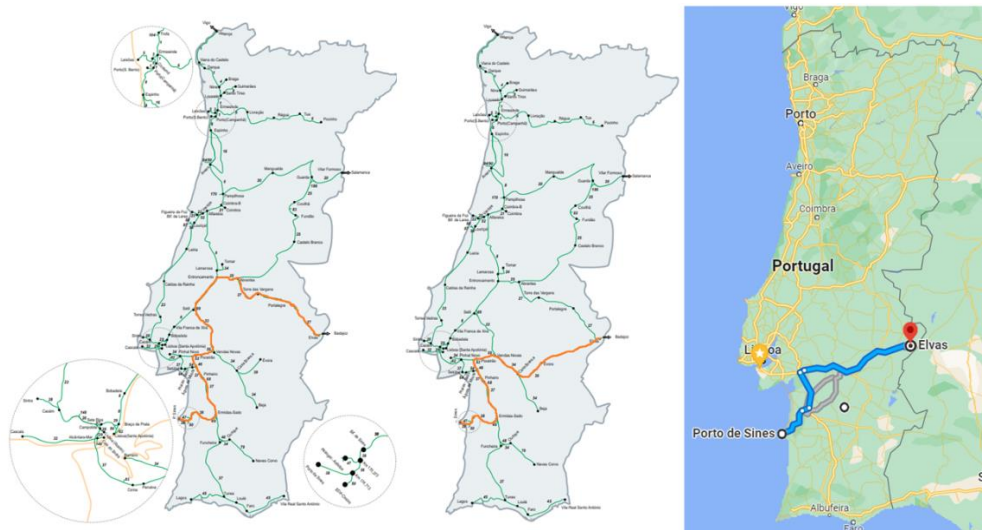


Figura 53– Sines - Elvas, Percurso do transporte Ferroviário à esquerda (Por Portalegre) e ao meio (Por Évora), Percurso do transporte rodoviário à direita

As Tabela 29 e Tabela 30 mostram os resultados provenientes da análise do caso de estudo. É possível verificar que o nível de gastos energéticos e de emissões do transporte ferroviário continua a ser muito superior ao do transporte rodoviário em todos os cenários, no entanto este transporta 32 vezes mais carga. Se se fizer a divisão dos gastos energéticos e da emissão de gases do transporte ferroviário por contentor, apura-se que existe uma diminuição da intensidade energética de 32 vezes (número de contentores transportados). Os valores por contentor da ferrovia quando comparados com o transporte rodoviário que se considera que transporta o mesmo contentor averigua-se que este é 4,81, 5,31 ou 5,07 vezes menores para a comparação do percurso que passa por Portalegre com a rodovia e 6,20, 6,83 ou 6,52 para o percurso que passa por Évora, consoante os diferentes cenários considerados.

Tabela 29 - Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Ferrovia, Caso de estudo IV

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	Total	Por Contentor
Ferrovia Por Portalegre								
Otimista	0	4,40	-	4,40	46875,10	1464,85	1964,07	61,38
Médio					85155,84	2661,12	3568,03	111,50
Pessimista					164989,44	5155,92	6913,06	216,03
Ferrovia Por Évora								
Otimista	0	3,42	-	3,42	36411,06	1137,85	1525,62	47,68
Médio					66146,30	2067,07	2771,53	86,61
Pessimista					128158,46	4004,95	5369,84	167,81

Tabela 30- Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na Rodovia, Caso de estudo IV

Cenário	Tempo de viagem [h]				Consumo Energético [MJ]		Emissões de CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	
	Urbano	Rural	Autoestrada	Total	Total	Por Contentor	TTW	WTW
Rodovia								
Otimista	0,18	0,08	2,57	2,82	7050,06	7050,06	486,68	634,51
Médio					14120,40	14120,40	974,76	1270,84
Pessimista					26122,74	26122,74	1803,31	2351,05

O mesmo se sucede com a emissão de CO<sub>2</sub> que se encontra diretamente ligada com os gastos energéticos, apresentando por contentor uma diminuição de 32 vezes em relação ao total gasto na viagem na ferrovia e uma diminuição 7,93, 8,74 ou 8,35 vezes por Portalegre e 10,21, 11,25 ou 10,75 por Évora, consoante o cenário considerado, quando comparado com o total emitido no transporte rodoviário. Este caso de estudo permite verificar que a nova rota da ferrovia irá permitir que se poupe 1,5 vezes mais energia que a anterior, em todos os cenários. Em relação às emissões é esperado que se emita 1,3 vezes menos CO<sub>2</sub> em todos os cenários. O tempo de viagem neste caso tem uma diferença considerável, cerca de 1 hora e 30 minutos para a rota de Portalegre. Contudo a rota de Évora irá retirar 1 hora ao percurso da ferrovia, passando a diferença a ser de apenas 30 minutos em relação à rota rodoviária. A nova rota irá permitir não só poupar energia e emitir menos emissões, mas também poupar tempo de viagem em percursos provenientes do sul do país.

Convertendo a energia total utilizada na viagem de rodovia de megajoule para litros por cada 100 quilómetros, obtemos para o cenário otimista, médio e pessimista os seguintes resultados: 76 l/100km, 151 l/100km e 279 l/100km. Dos resultados obtidos, o que se apresenta mais coerente é o cenário otimista.

#### 4.5. Mapas Energéticos e de Emissões por tonelada transportada

A análise da Figura 54, Figura 56, Figura 58, Figura 60 demonstra o consumo energético do transporte ferroviário por tonelada de mercadoria transportada, identificando-se uma região do país em comum onde independentemente do local de onde o transporte parta, exige uma maior necessidade de energia para chegar a esse local. Neste caso este local é a região nordeste do país abrangida pelos distritos de Vila Real, Bragança, Guarda e Viseu, que se deve à falta de infraestruturas ferroviárias para o transporte de mercadorias nesta região, obrigando à intervenção do transporte rodoviário por maiores distâncias.

Outra região que se identifica é a região do litoral centro que abrange os distritos de Lisboa e Leiria nos mapas com partida da região sul do país, Faro e Sines, onde o consumo energético se encontra nas mesma região de cores de locais mais distantes, por exemplo Porto. Este aumento de energia consumida acontece, pela ligação para o transporte de mercadorias da região do litoral centro ao sul do país ser realizada através de Santarém, e as conexões desse ponto ao litoral desviarem-se muito da rota, tornando as conexões mais demoradas. De forma a diminuir este tempo recorre-se ao uso do transporte rodoviário por maiores distâncias.

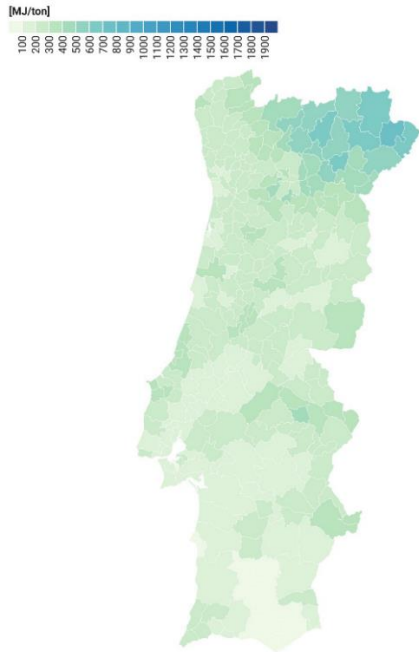
Outra região identificada é a região sul e sudeste do país onde existe ainda não houve modernização das linhas férreas ou no caso da região sudeste a falta de infraestruturas que não permite que o transporte ferroviário chegue a locais que se encontram mais junto da fronteira.

Os mapas de emissões por tonelada transportada na ferrovia, representados na Figura 62, Figura 64, Figura 66 e Figura 68, são equivalentes aos correspondentes mapas energéticos uma vez que as emissões de CO<sub>2</sub> emitidas são uma consequência direta do uso energético. Sendo evidente a possibilidade de identificar as mesmas regiões acima mencionadas.

A Figura 55, Figura 57, Figura 59 e Figura 61 representam o consumo energético por tonelada transportada na rodovia. Em relação aos mapas energéticos anteriores da ferrovia nota-se uma maior uniformidade e evolução dos gastos energéticos em relação à ferrovia, isto deve-se à existência de uma rede de infraestruturas com maior capacidade de chegar aos locais e de forma mais direta. Tornando assim as pontas do país os pontos onde existe um maior gasto energético para os alcançar o destino.

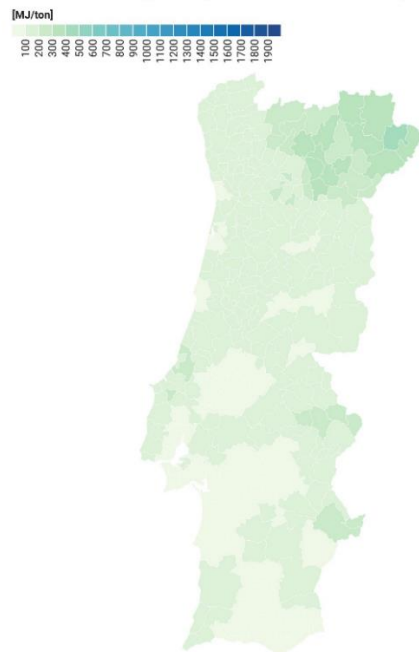
Tal como se sucede na ferrovia, o mesmo acontece na rodovia com os mapas de emissões por tonelada transportada a serem uma consequência direta do gasto energético verificado. A Figura 63, Figura 65, Figura 67 e Figura 69 representam as emissões emitidas por tonelada de mercadoria transportada na rodovia.

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



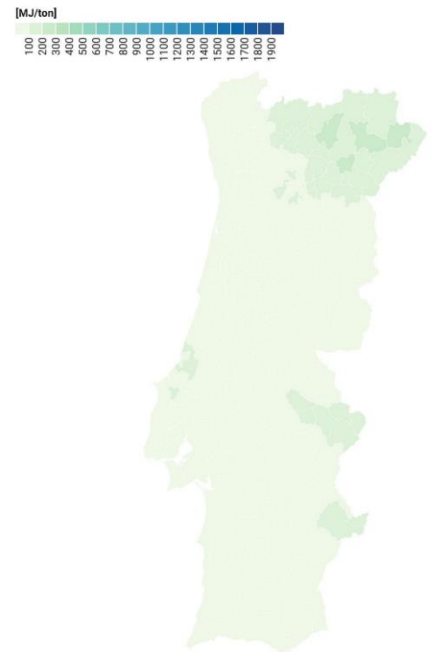
Created with Datawrapper

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



Created with Datawrapper

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



Created with Datawrapper

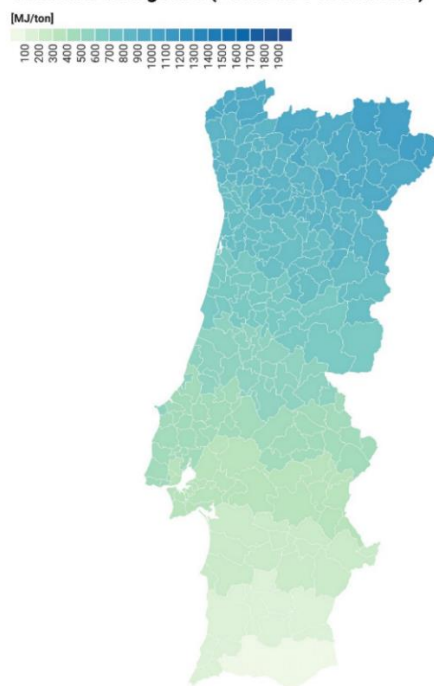
Figura 54 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



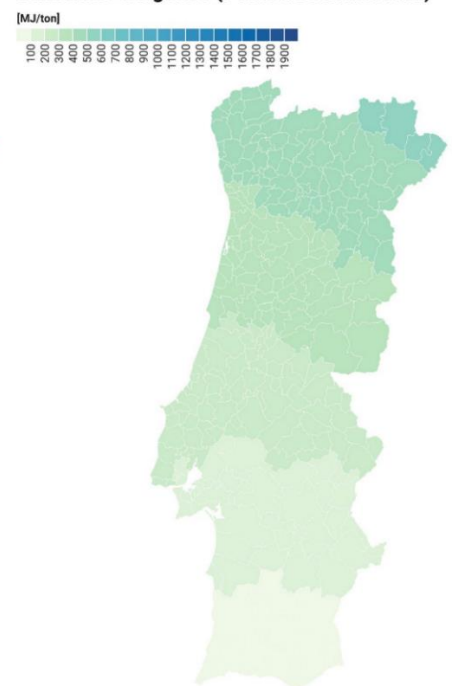
Created with Datawrapper

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



Created with Datawrapper

Consumo Energético (Ponto de Partida Faro)



Created with Datawrapper

Figura 55 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

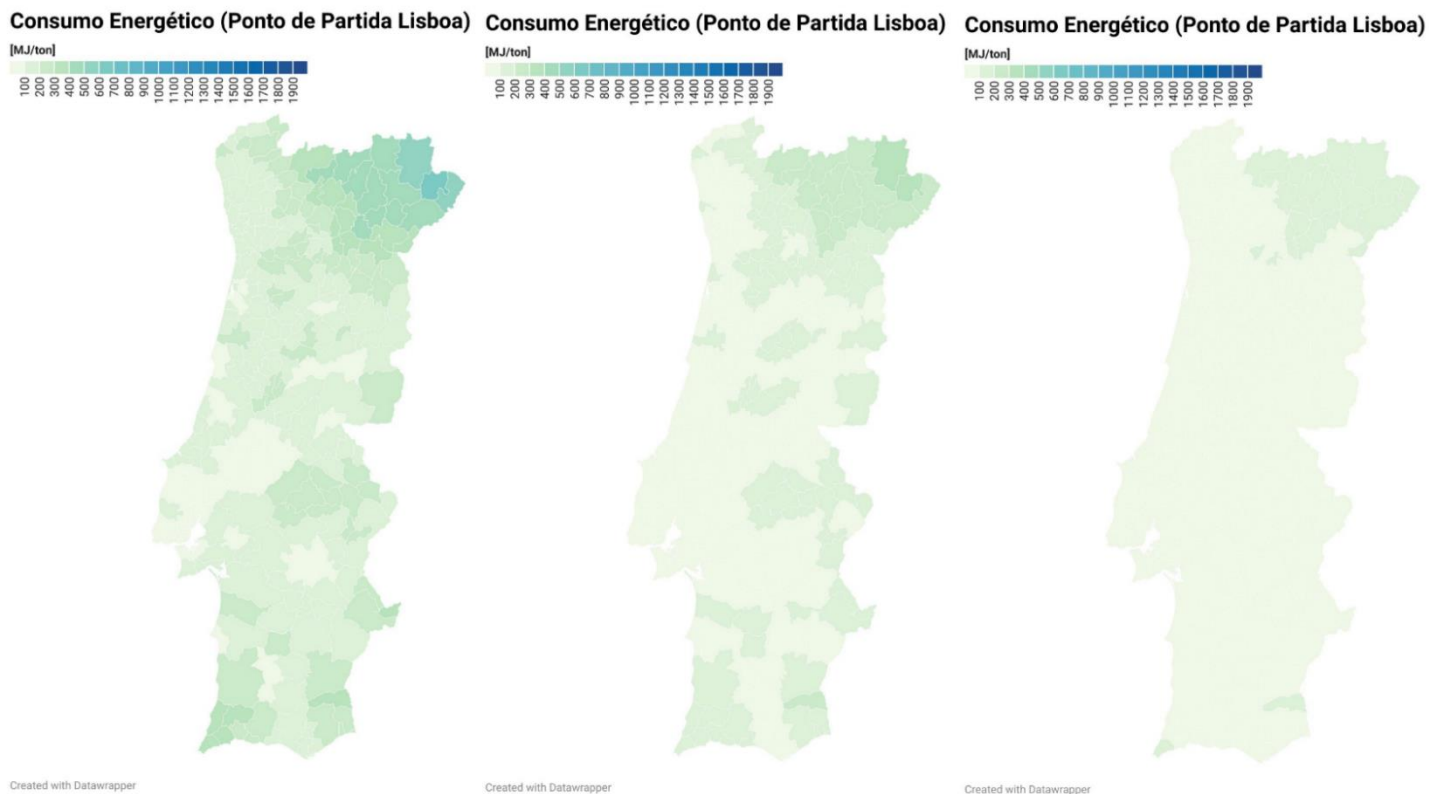


Figura 56 - Consumo energético ferroviário por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

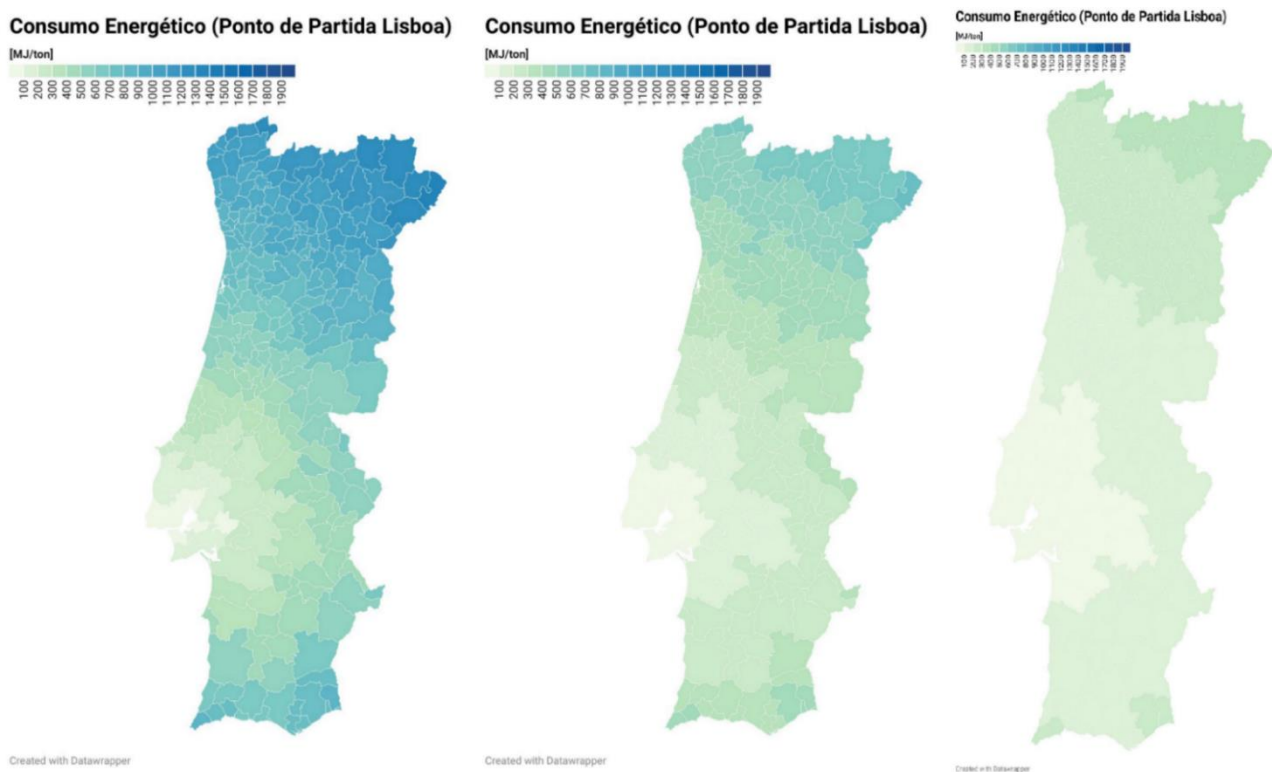


Figura 57 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

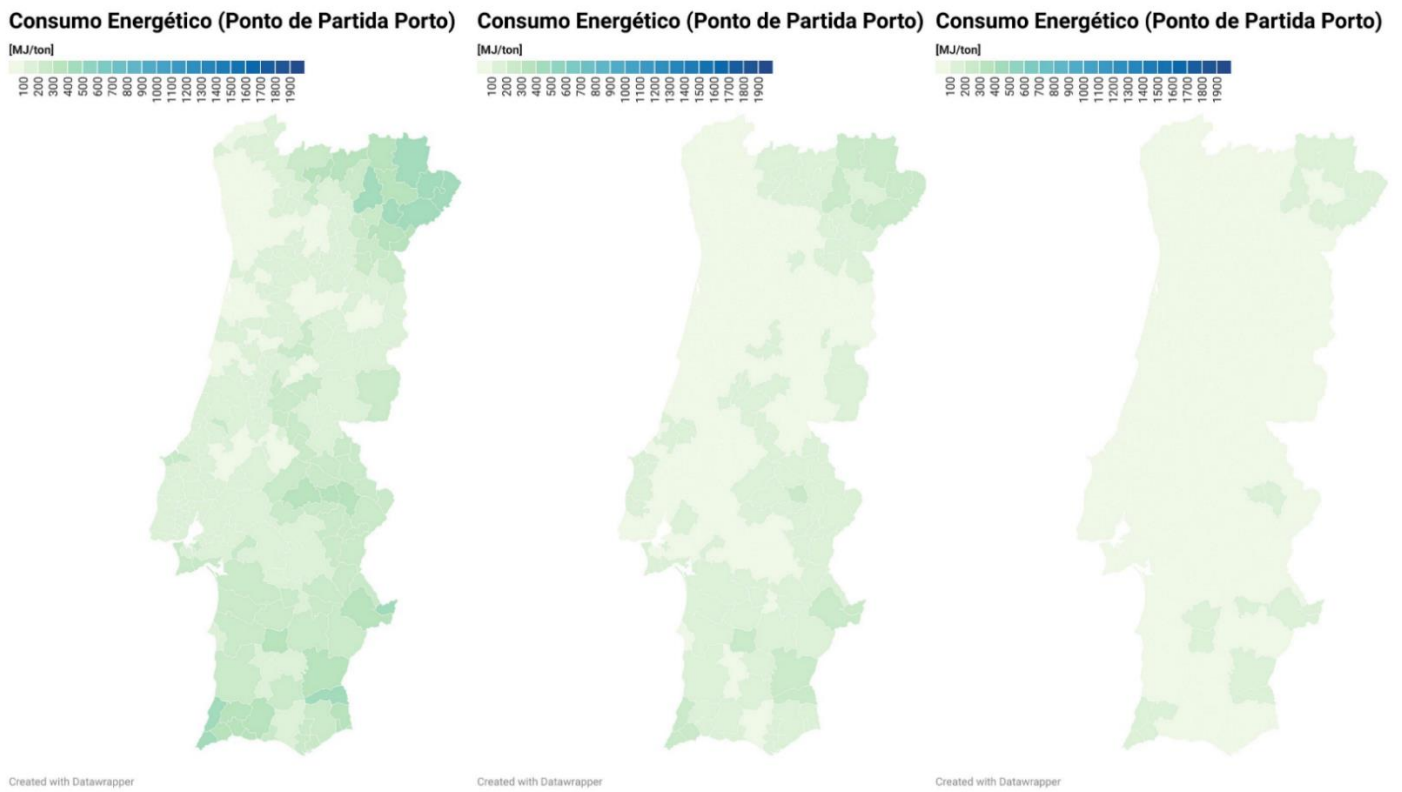


Figura 58 - Consumo energético ferrovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

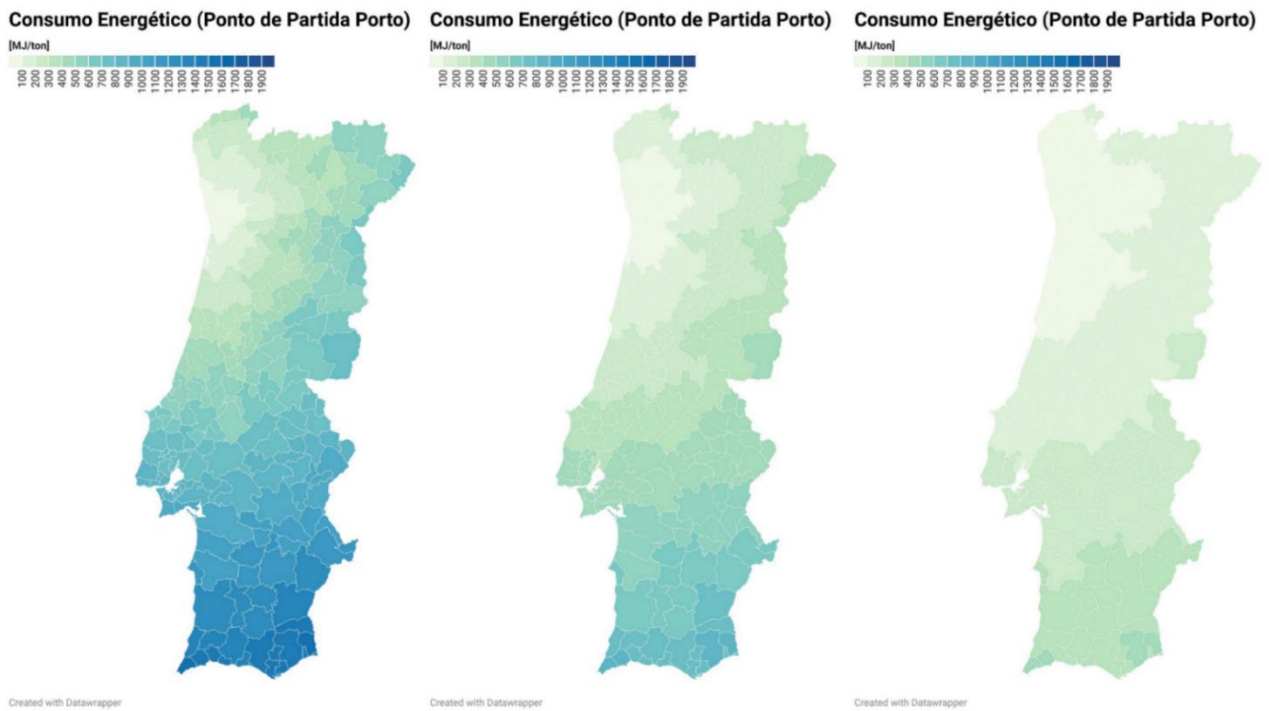


Figura 59 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

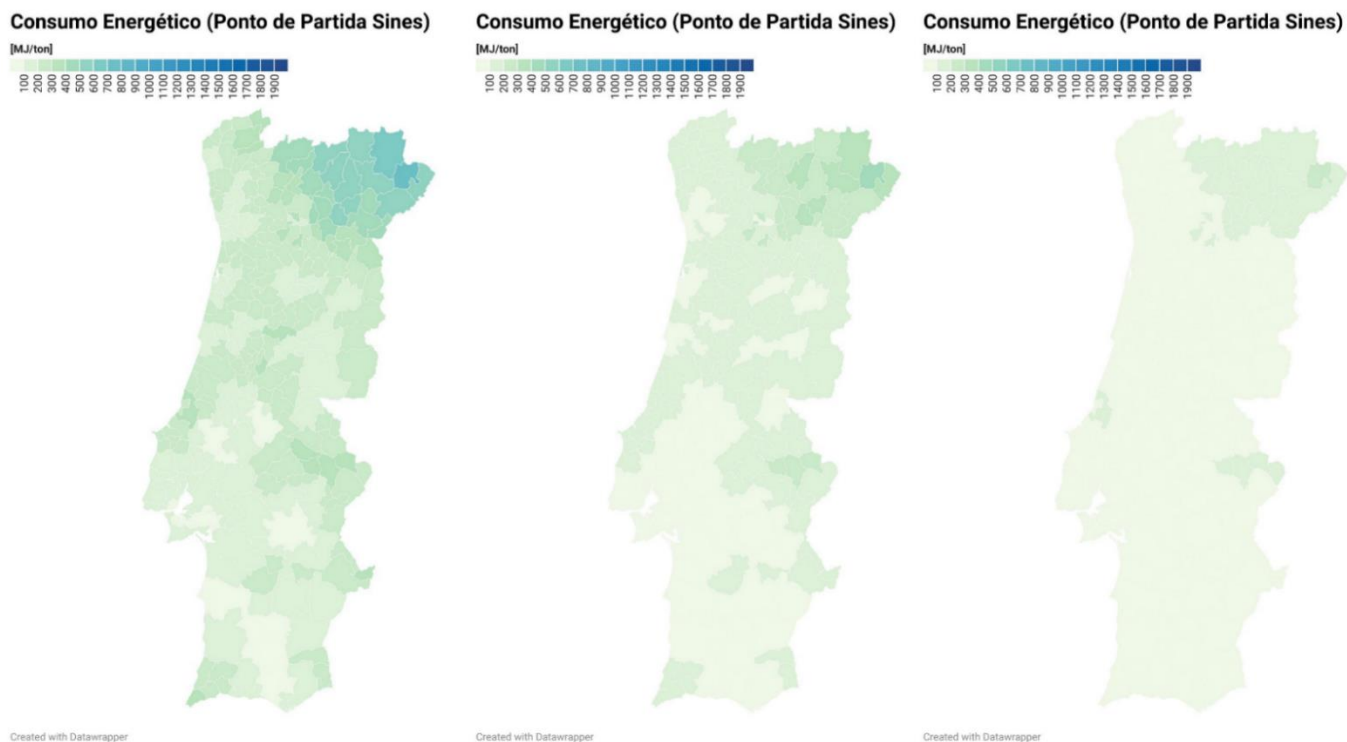


Figura 60 - Consumo energético ferroviário por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

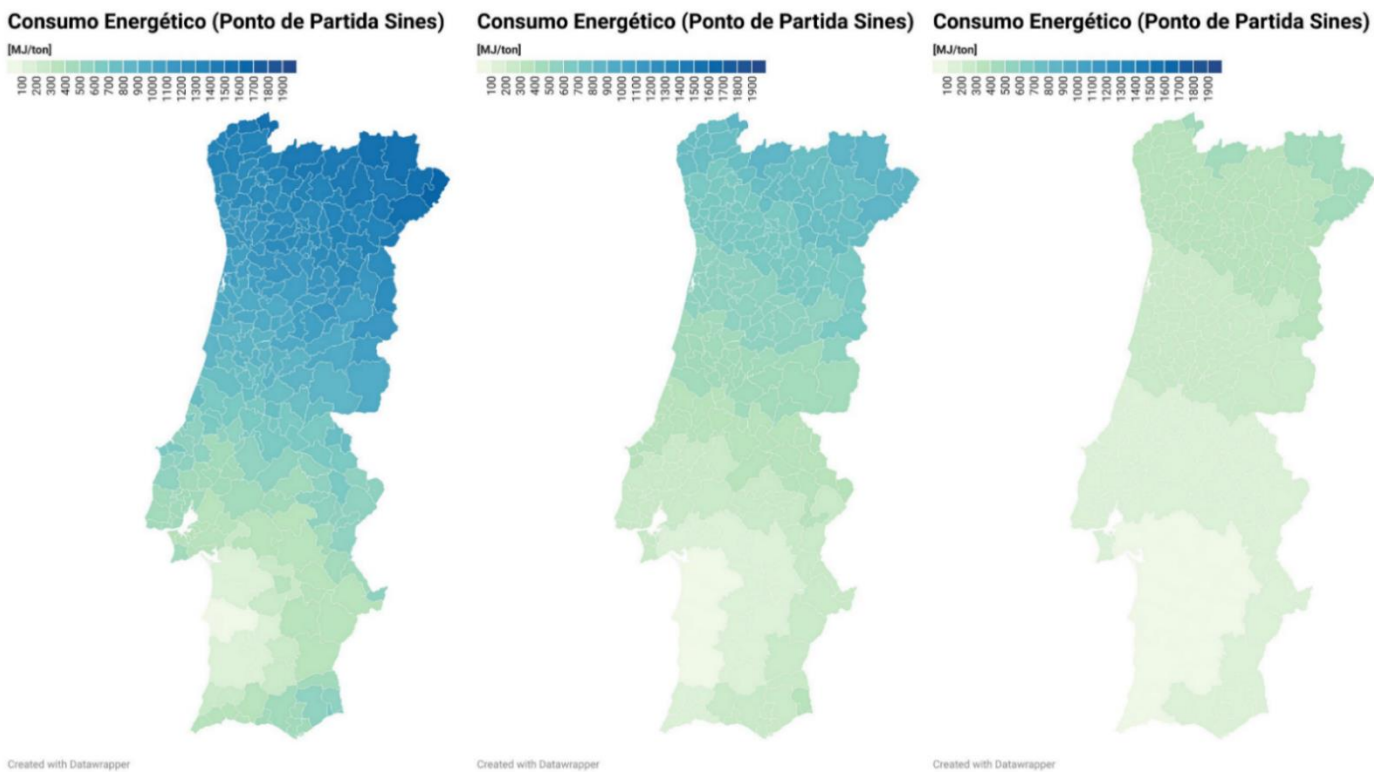


Figura 61 - Consumo energético rodoviário por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

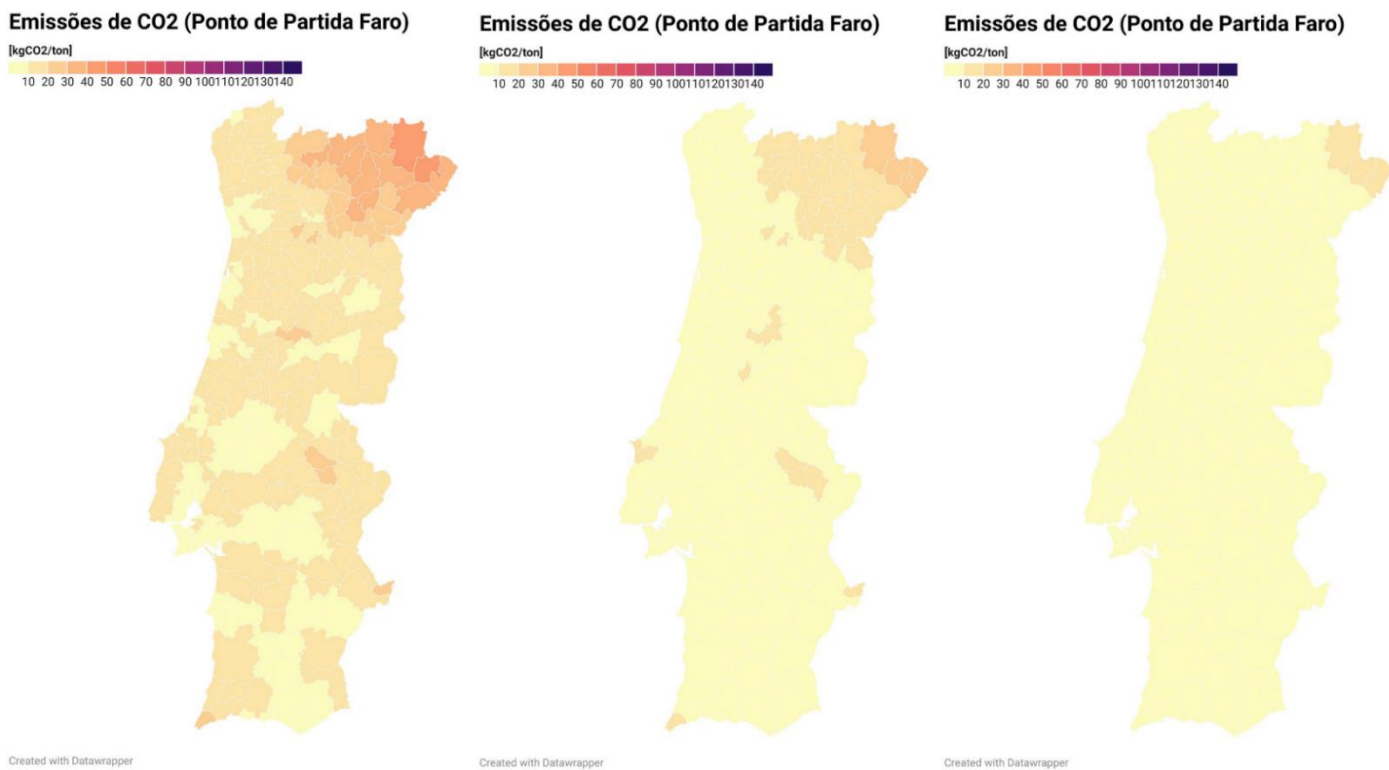


Figura 62 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

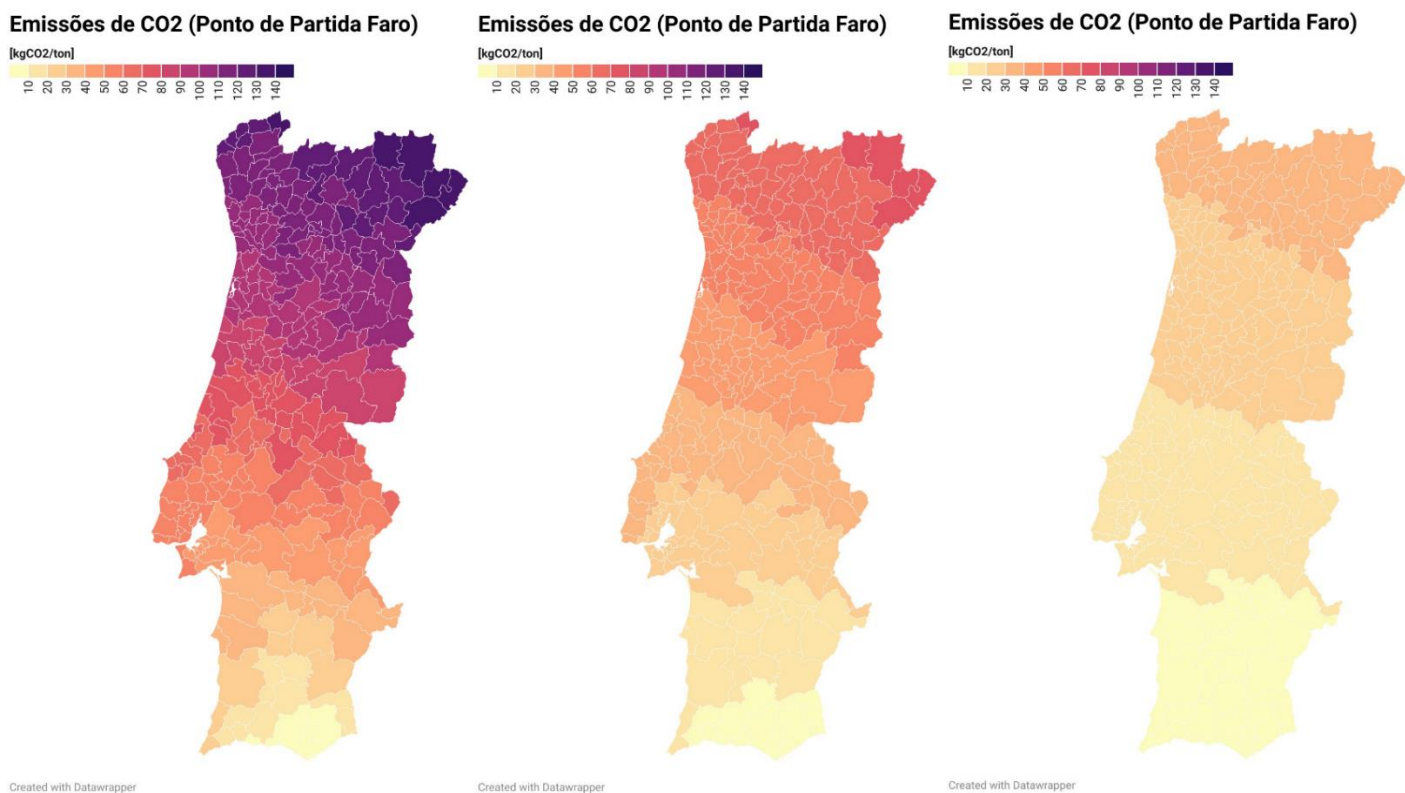


Figura 63 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

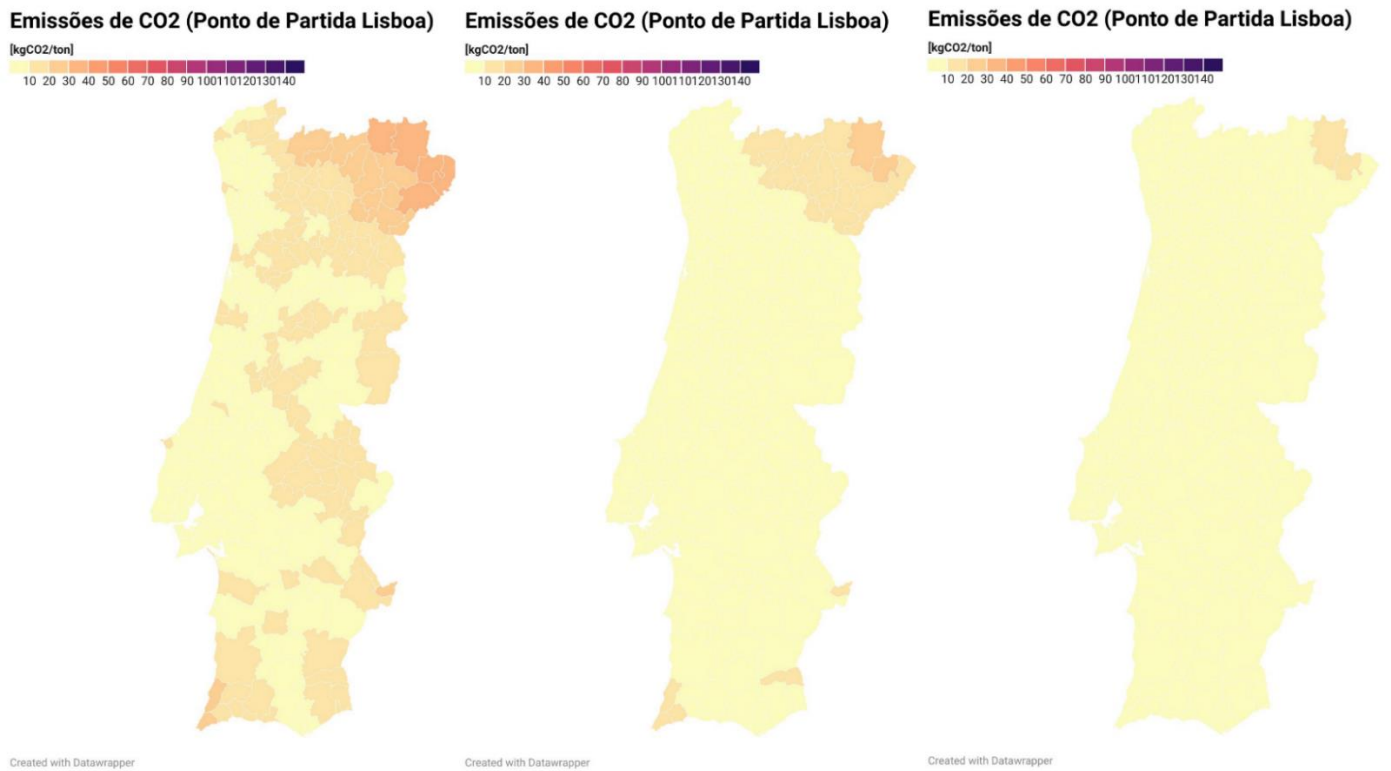


Figura 64 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

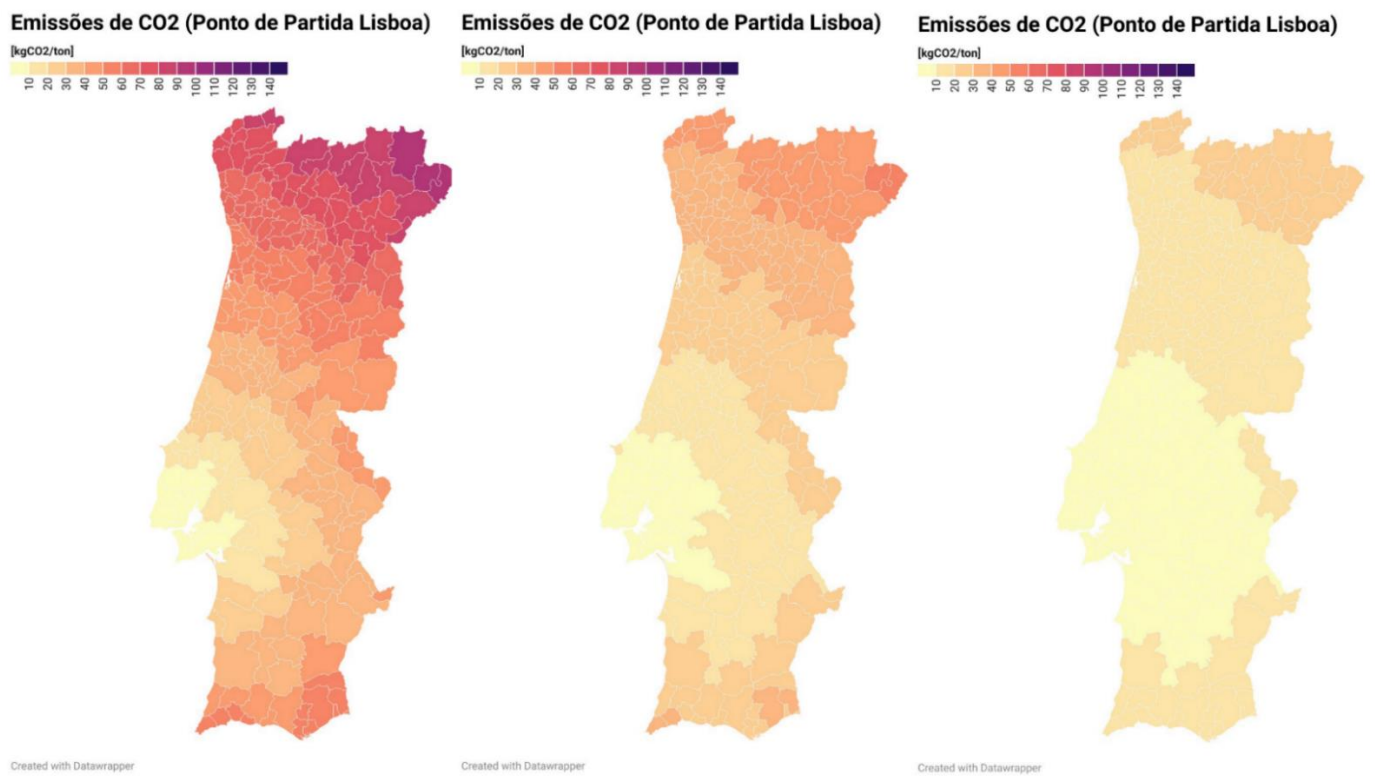


Figura 65 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

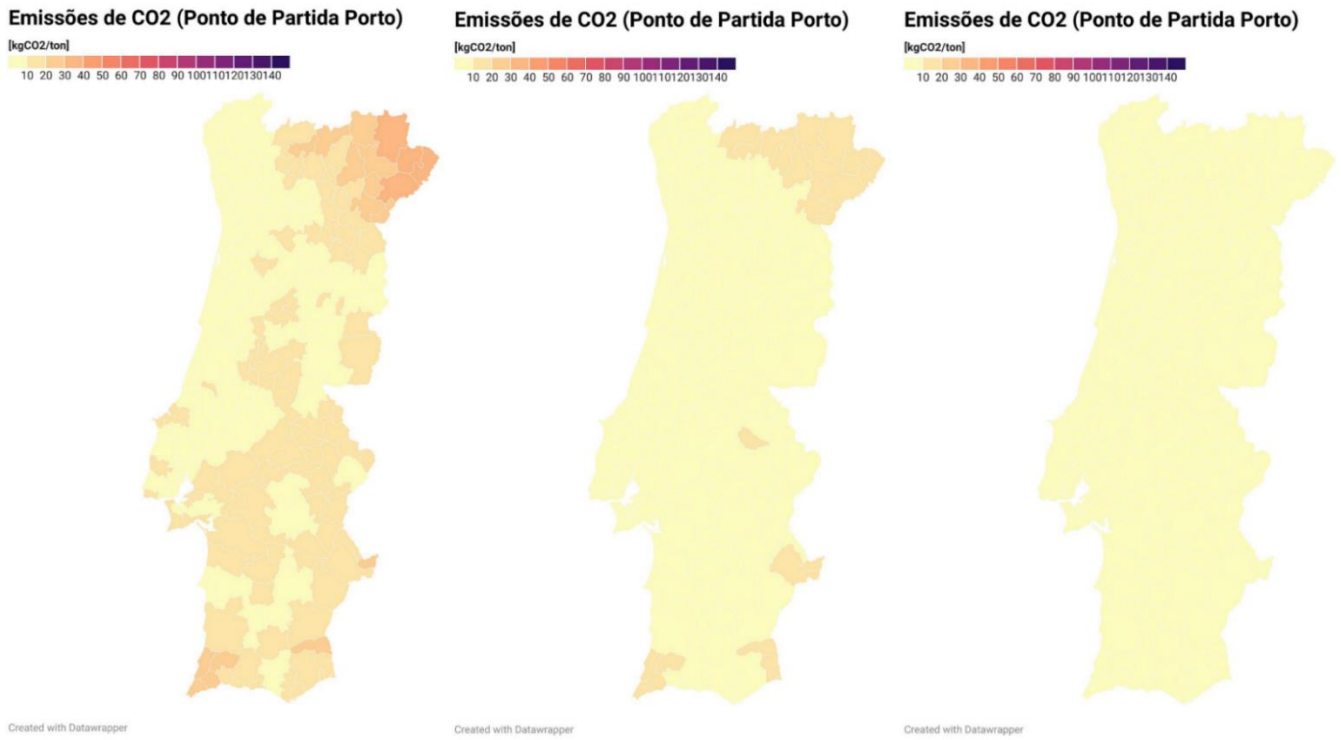


Figura 66 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

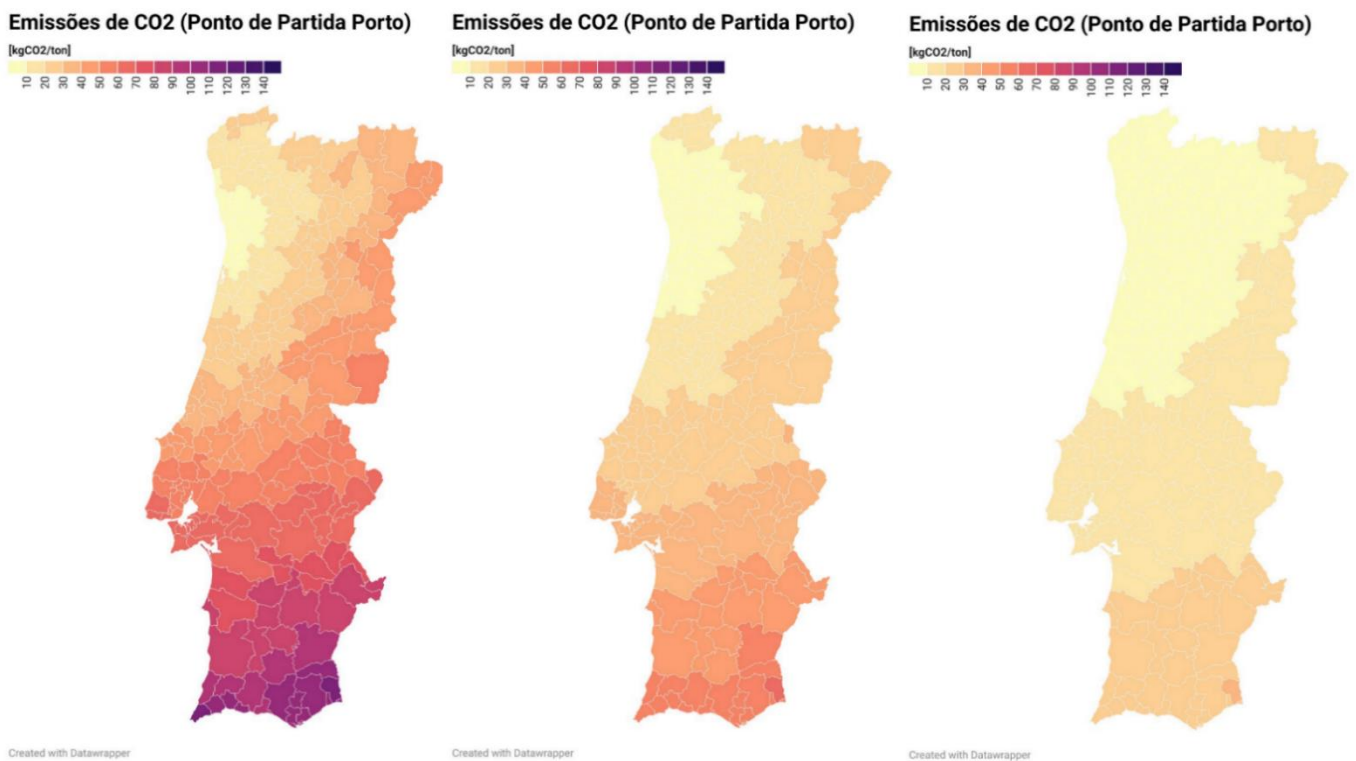


Figura 67 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

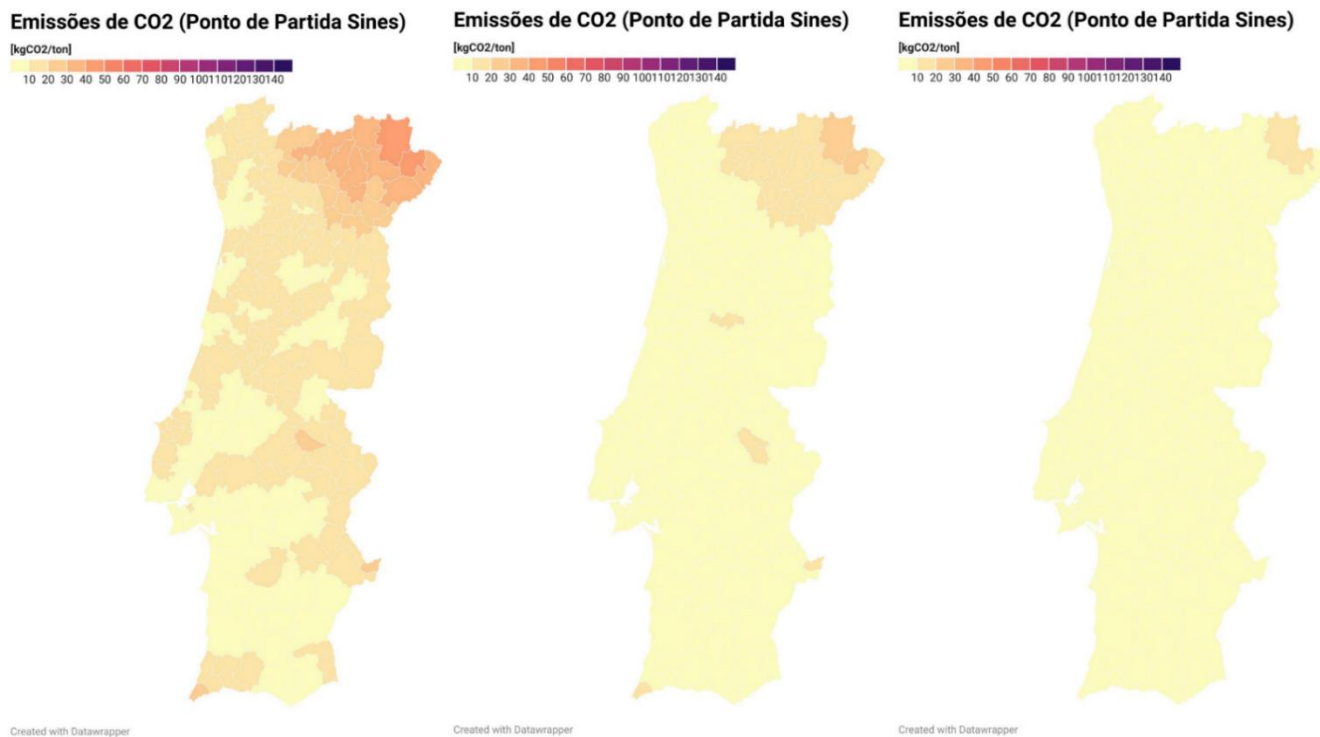


Figura 68 - Emissões de CO2 na ferrovia por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

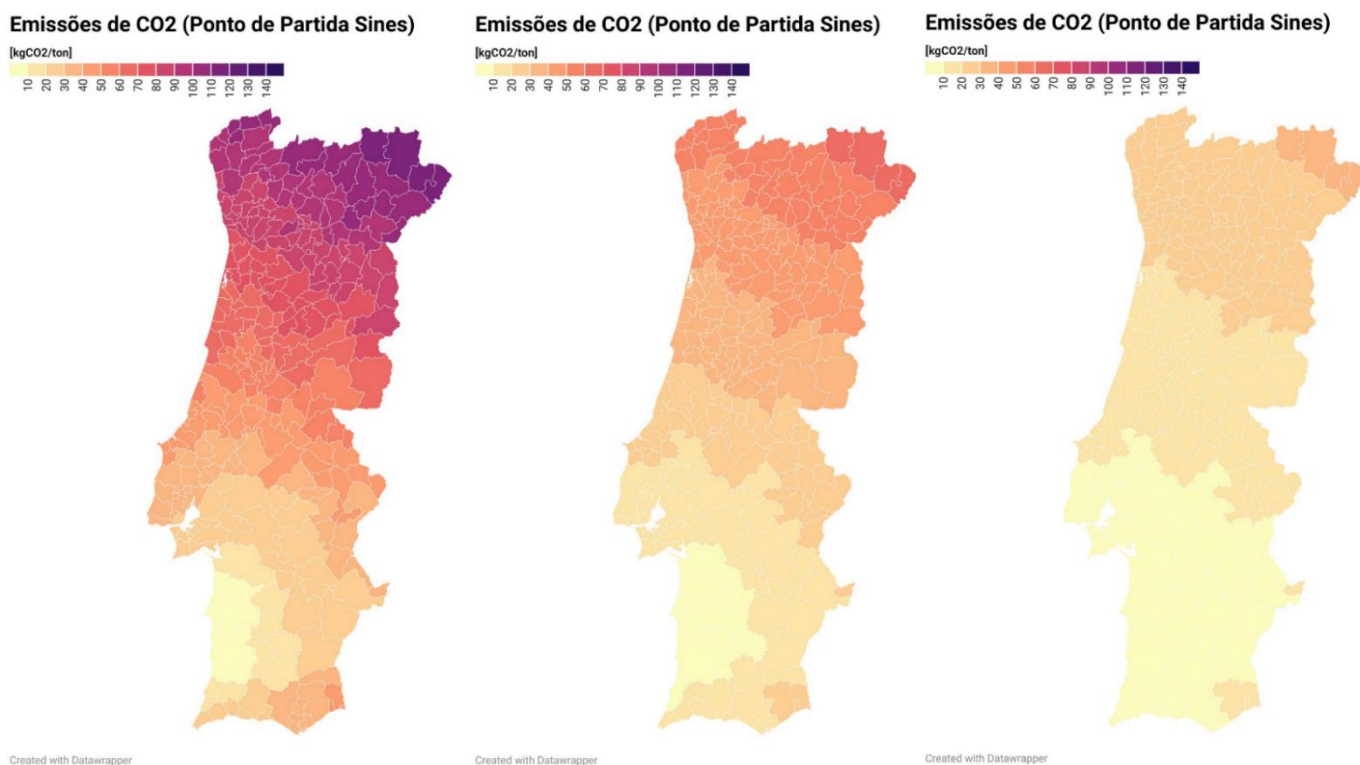


Figura 69 - Emissões de CO2 na rodovia por tonelada transportada com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

## 4.6. Mapas Energéticos e de Emissões

Da análise da Figura 70, Figura 72, Figura 74 e Figura 76 demonstram o consumo energético do transporte ferroviário no ano de 2021, identifica-se ao contrário do que se sucedia anteriormente mais regiões onde as necessidades energéticas são maiores e também uma diminuição das necessidades energéticas noutras. Esta variação nas manchas coloridas no mapa deve-se à população existente nestas localidades. As regiões de Vila Real, Bragança, Guarda e Viseu continuam, independentemente do local de onde o transporte parta, a exigir uma maior necessidade energética para chegar a esses locais.

Outra região que se continua a identificar é a região do litoral centro que abrange os distritos de Lisboa e Leiria nos mapas com partida da região sul do país, Faro e Sines, onde o consumo energético se encontra na mesma região de cores de locais mais distantes, por exemplo Porto. A região sul do Algarve e região do Alentejo é a que se destaca mais em comparação com os mapas ferroviários anteriores, onde são aparentes as maiores necessidades energéticas para transportar mercadorias até estes locais, mesmo de locais que pertencem a estas regiões, como Sines e Faro.

Tal como se sucedia anteriormente com os outros mapas de emissões na ferrovia, o mesmo acontece com os mapas de emissões representados na Figura 78, Figura 80, Figura 82 e Figura 84, onde existe uma relação direta com os mapas energéticos uma vez que as emissões de CO<sub>2</sub> emitidas. Sendo evidente a possibilidade de identificar as mesmas regiões acima mencionadas.

A Figura 71, Figura 73, Figura 75 e Figura 77 representam o consumo energético no ano de 2021 na rodovia. Em relação aos mapas energéticos anteriores da ferrovia nota-se ainda uma uniformidade e evolução dos gastos energéticos em relação à ferrovia, no entanto, nota-se que alguns pontos já apresentam uma maior necessidade energética mais cedo. Isto deve-se ao aumento do consumo de uma forma constante em relação à distância percorrida e a variação da população e as suas necessidades nas diferentes localidades.

Comparando os mapas energéticos da ferrovia com os da rodovia, nota-se que as zonas mais chegadas ao ponto de partida nos mapas da rodovia, não diferem em grande escala com os da ferrovia o que favorece a utilização da mesma. Por um lado, estes percursos de curta distância são preferencialmente realizados pela rodovia pela acessibilidade do transporte a qualquer local ao contrário do que se sucede na ferrovia, por essa razão embora energeticamente a ferrovia seja mais eficiente, esta ainda não apresenta versatilidade suficiente para ser utilizada em percursos de curta distância.

Tal como se sucede na ferrovia, o mesmo acontece na rodovia com os mapas de emissões por tonelada transportada a serem uma consequência direta do gasto energético verificado. A Figura 79, Figura 81, Figura 83 e Figura 85 representam as emissões emitidas no ano de 2021 de mercadoria transportada na rodovia.

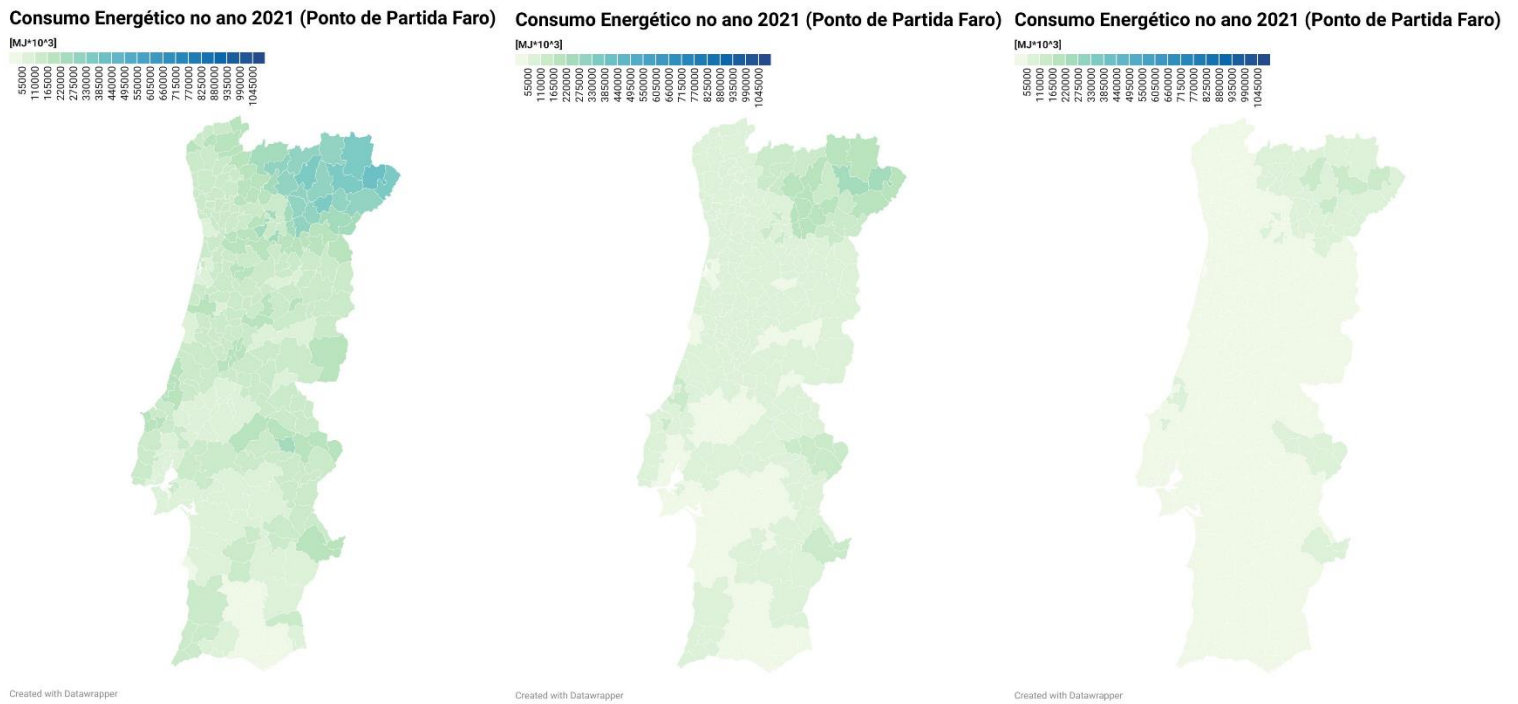


Figura 70 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

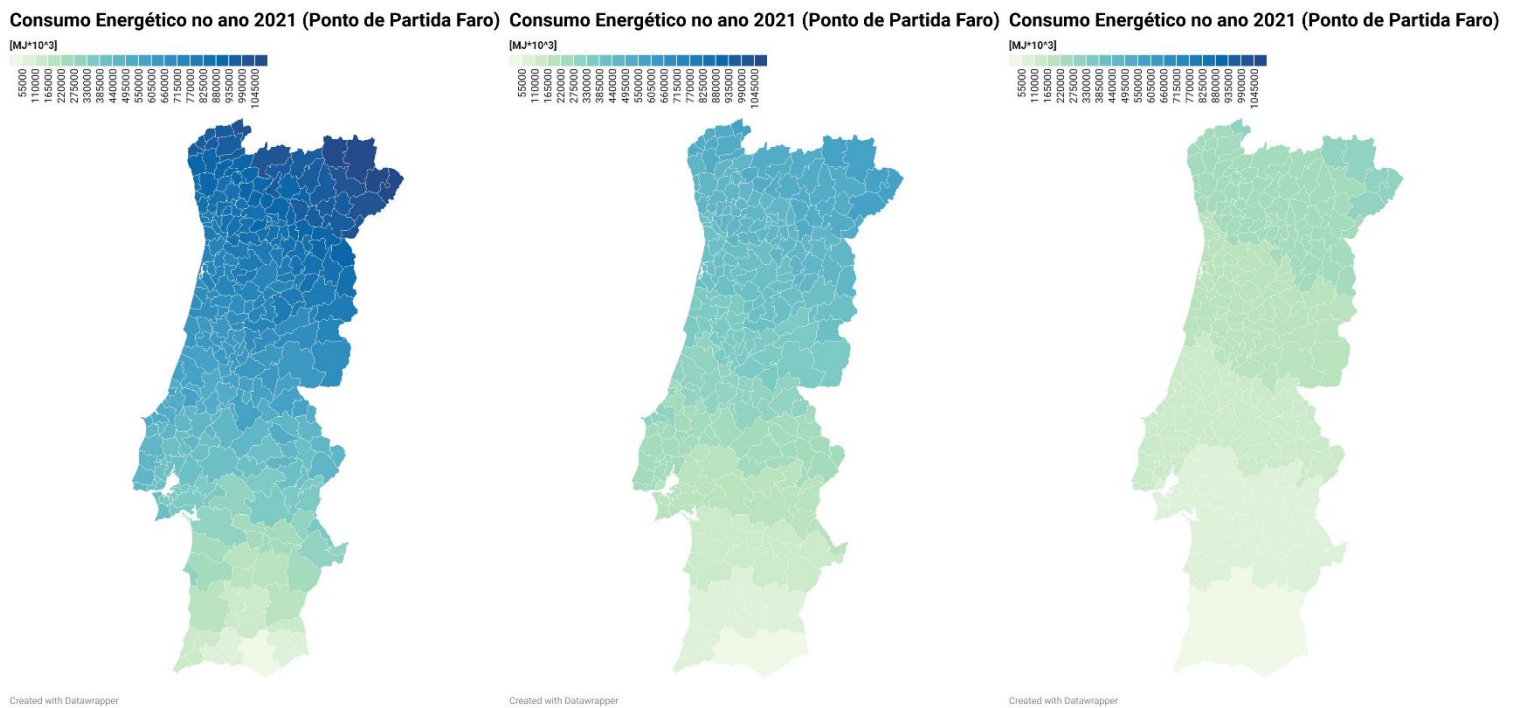


Figura 71 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

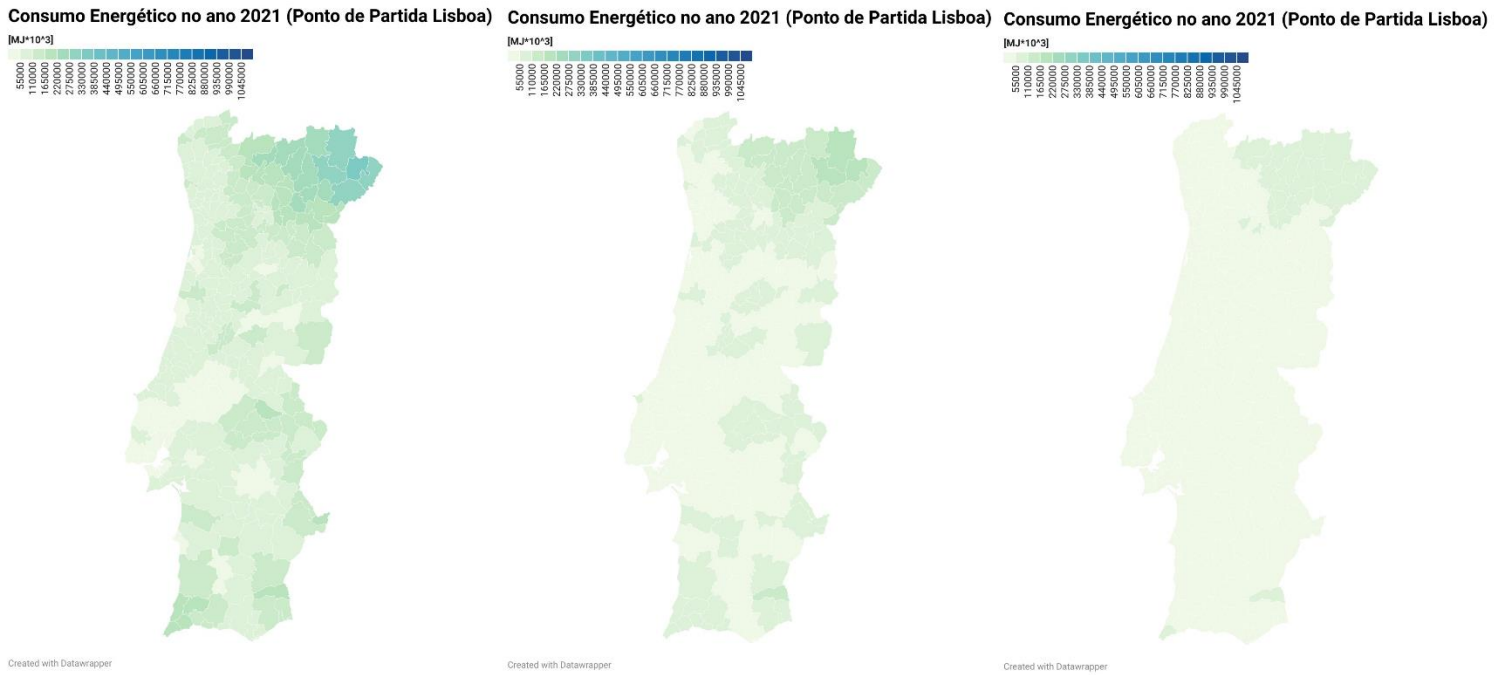


Figura 72 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

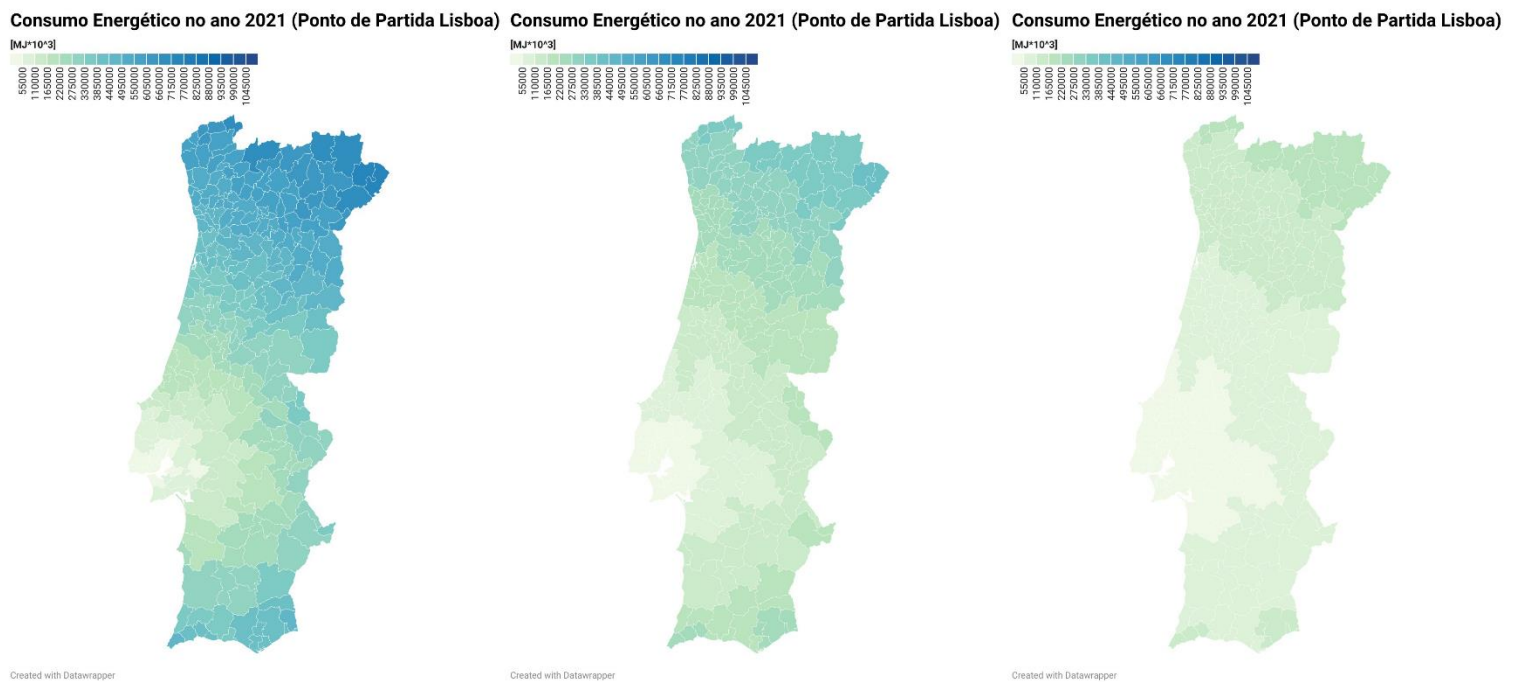


Figura 73 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

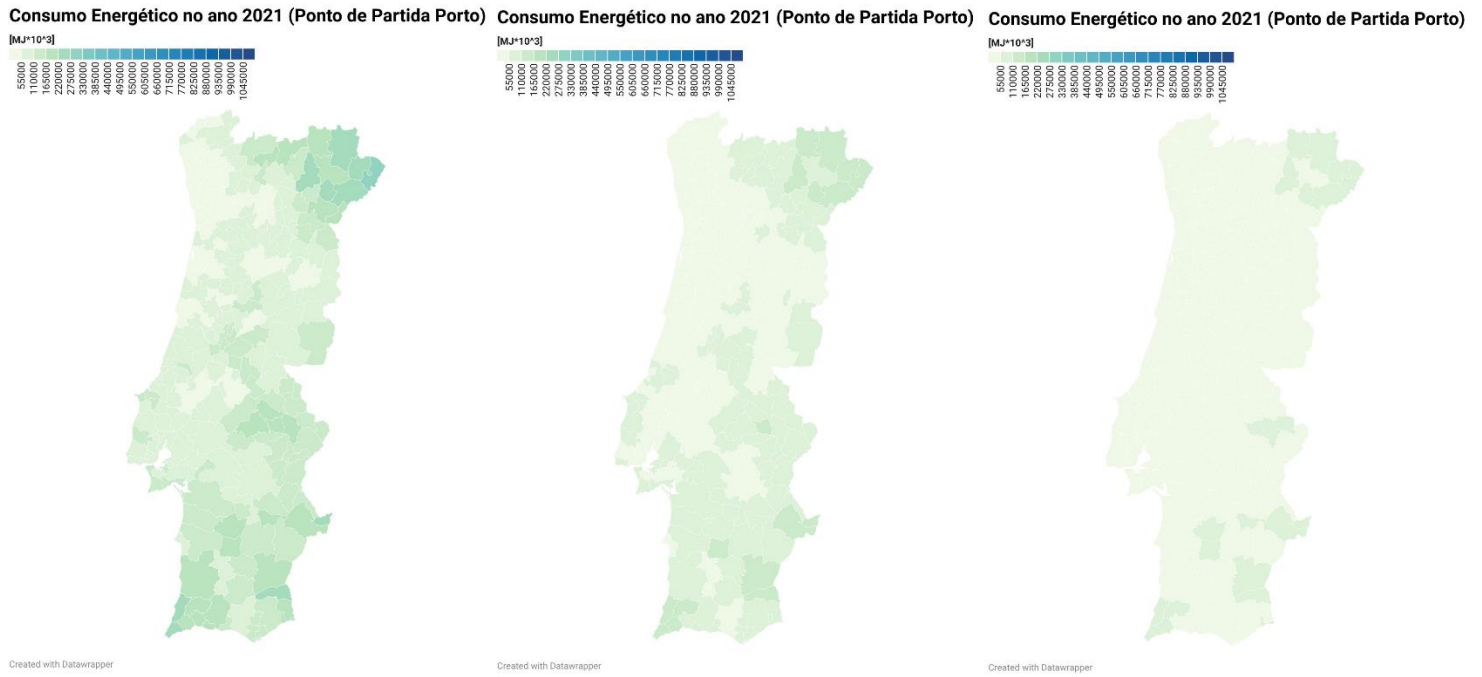


Figura 74 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

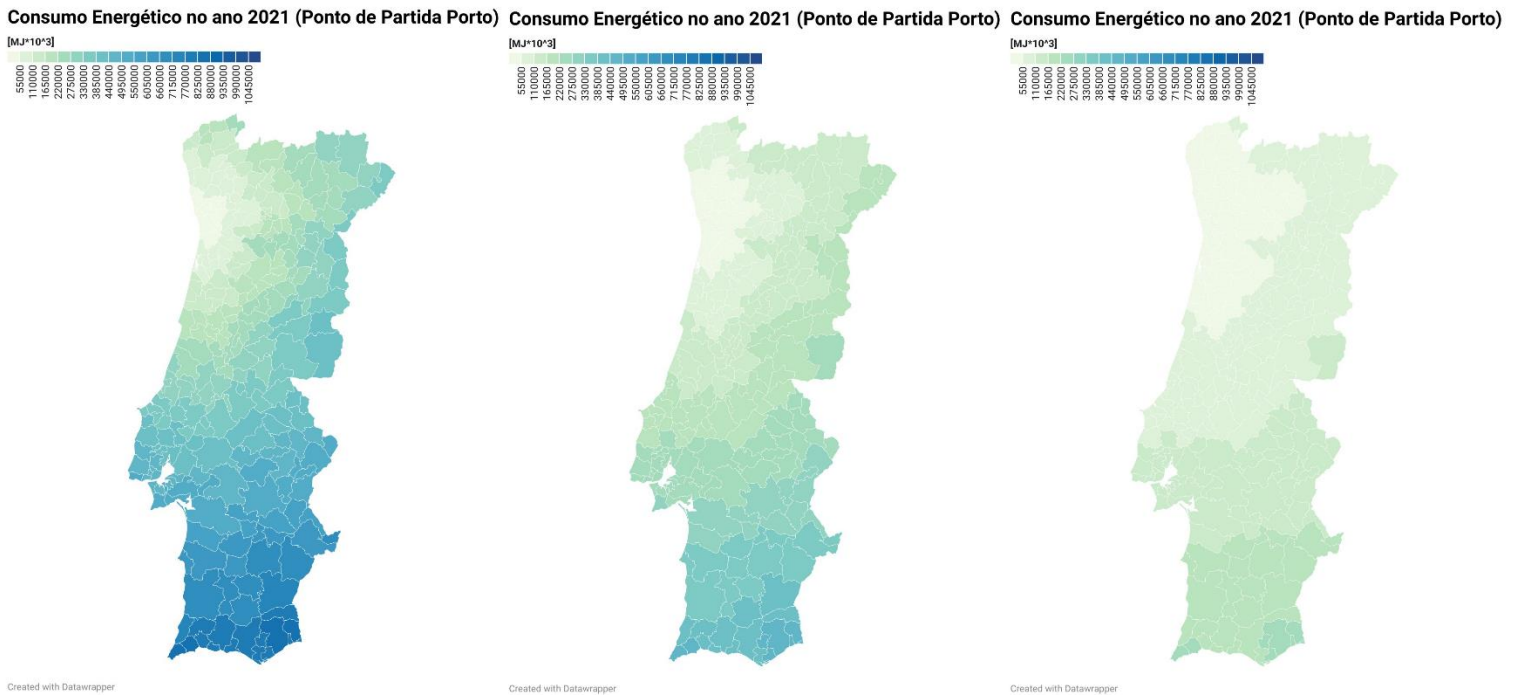


Figura 75 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

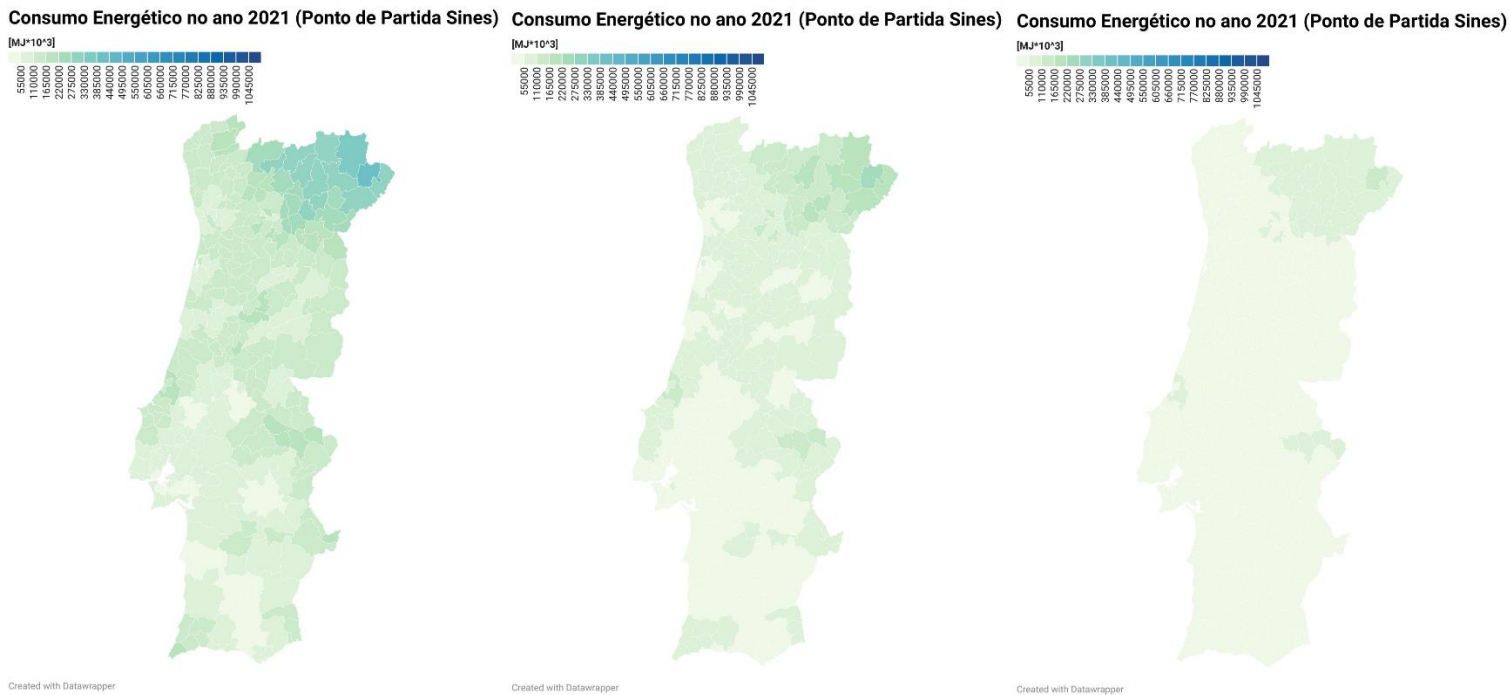


Figura 76 - Consumo energético ferroviário no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

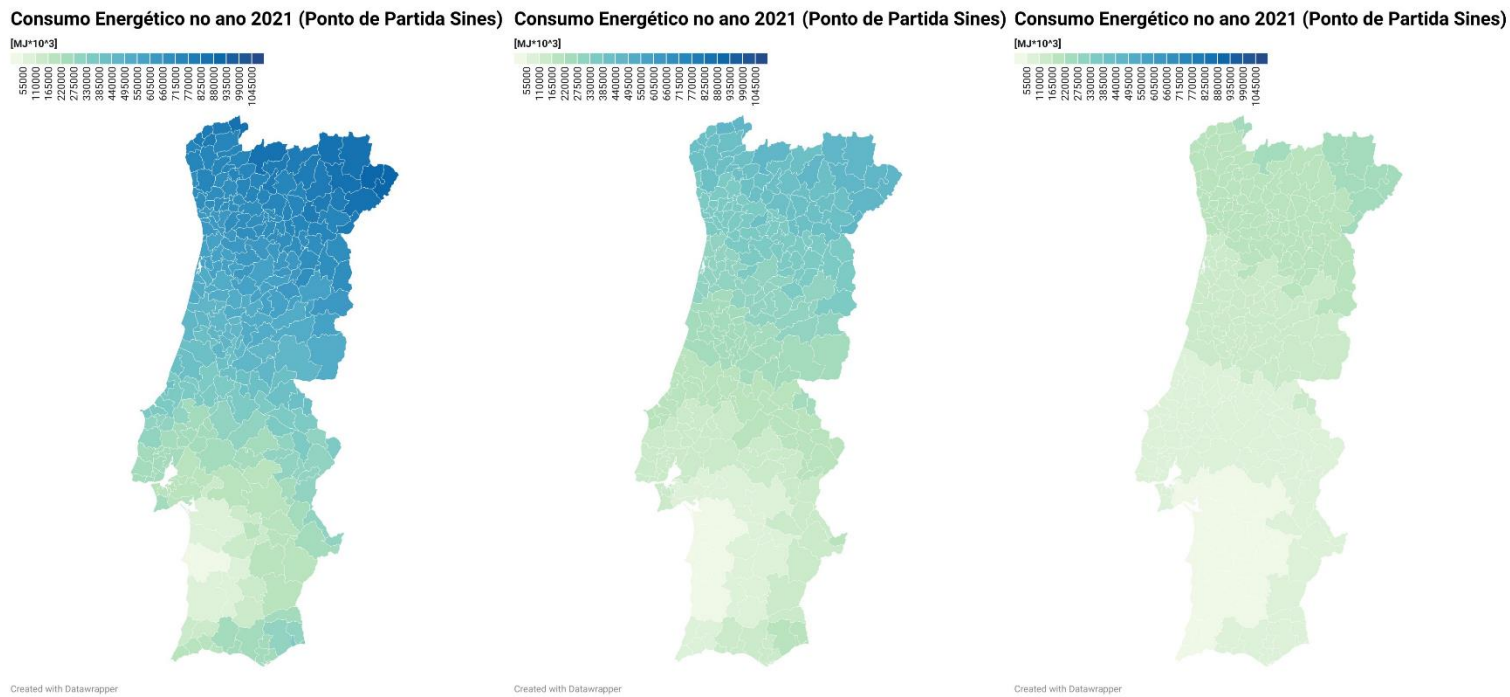


Figura 77 - Consumo energético rodoviário no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

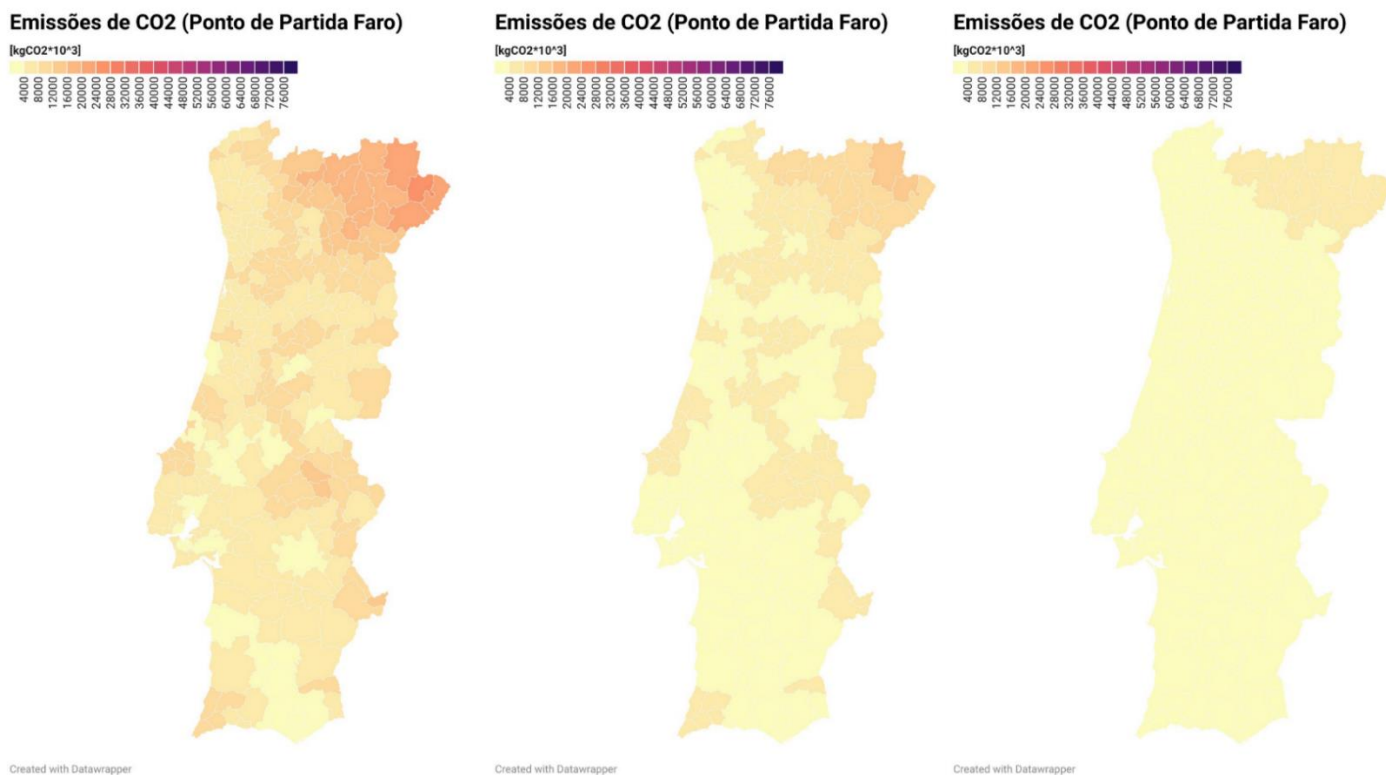


Figura 78 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

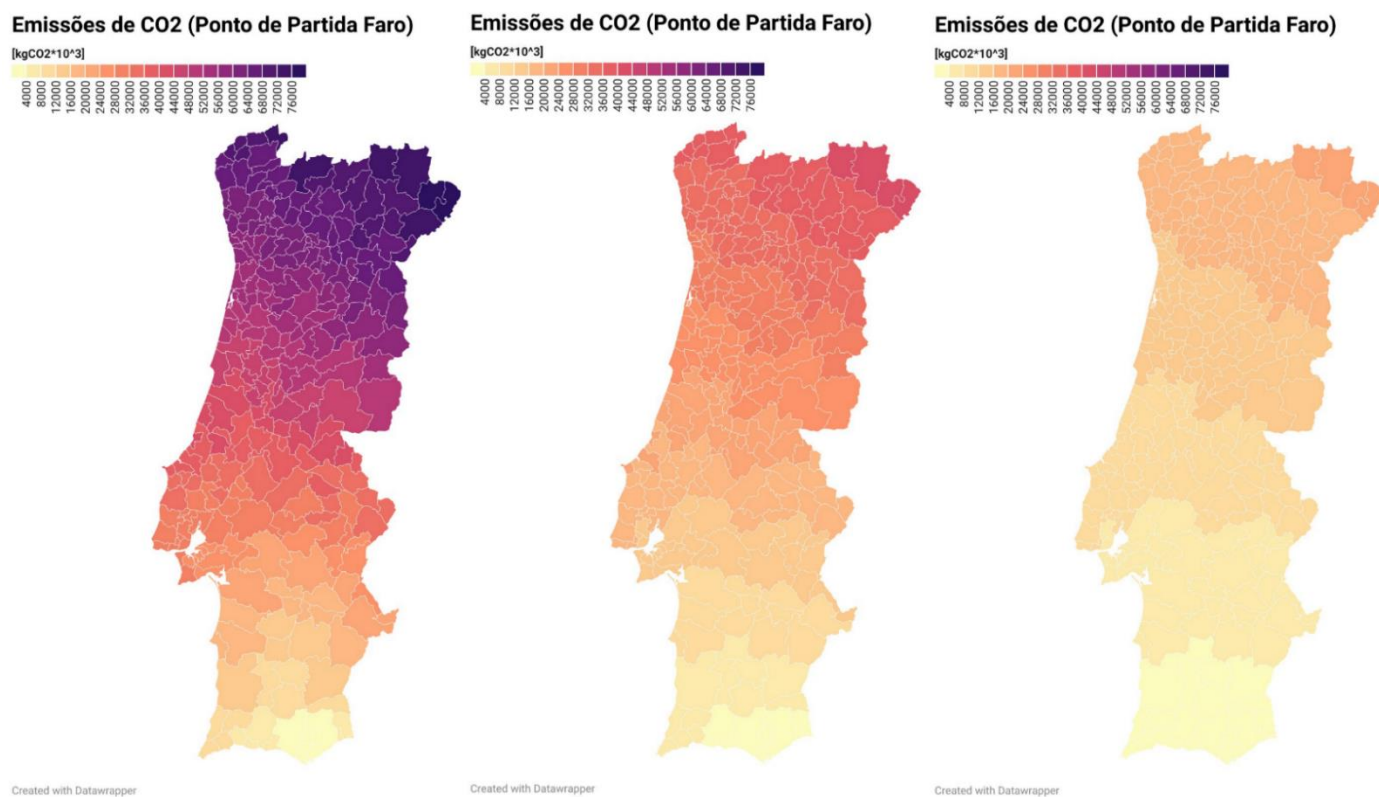


Figura 79 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Faro, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

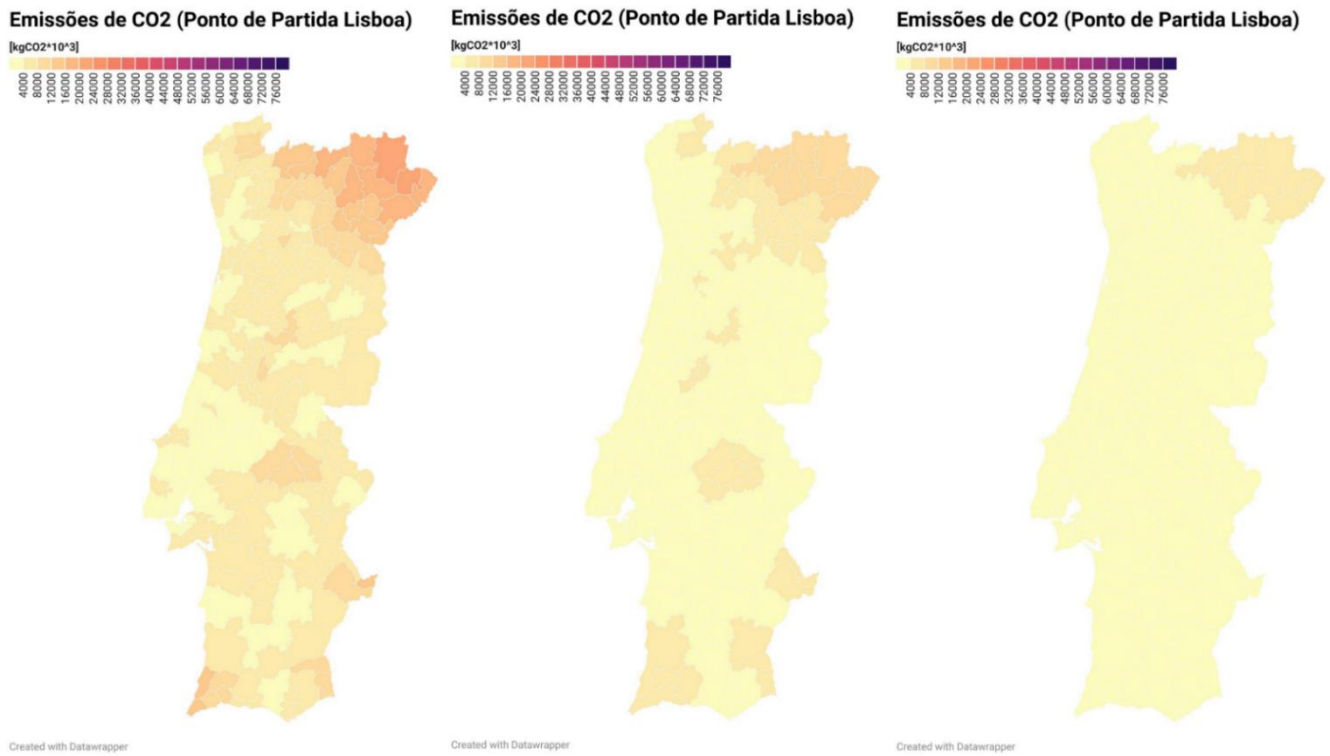


Figura 80 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

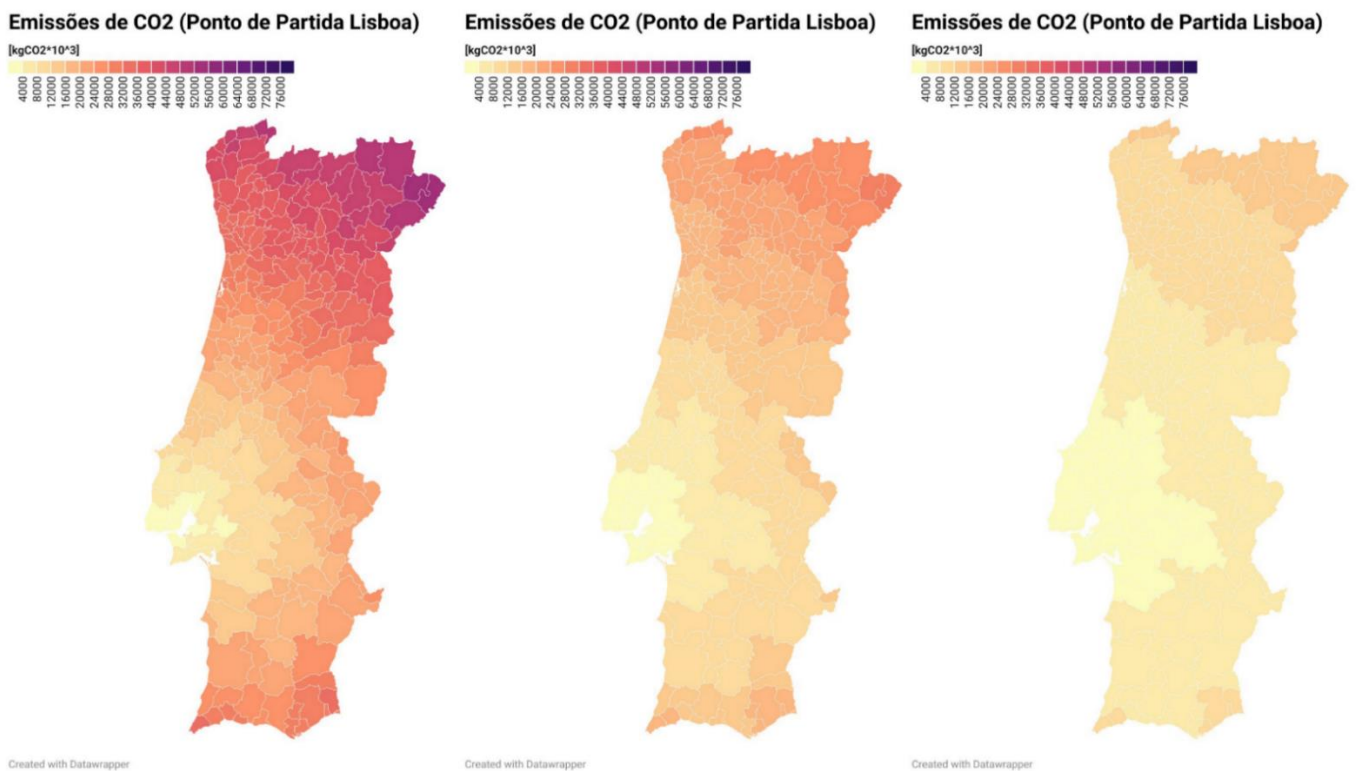


Figura 81 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Lisboa, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

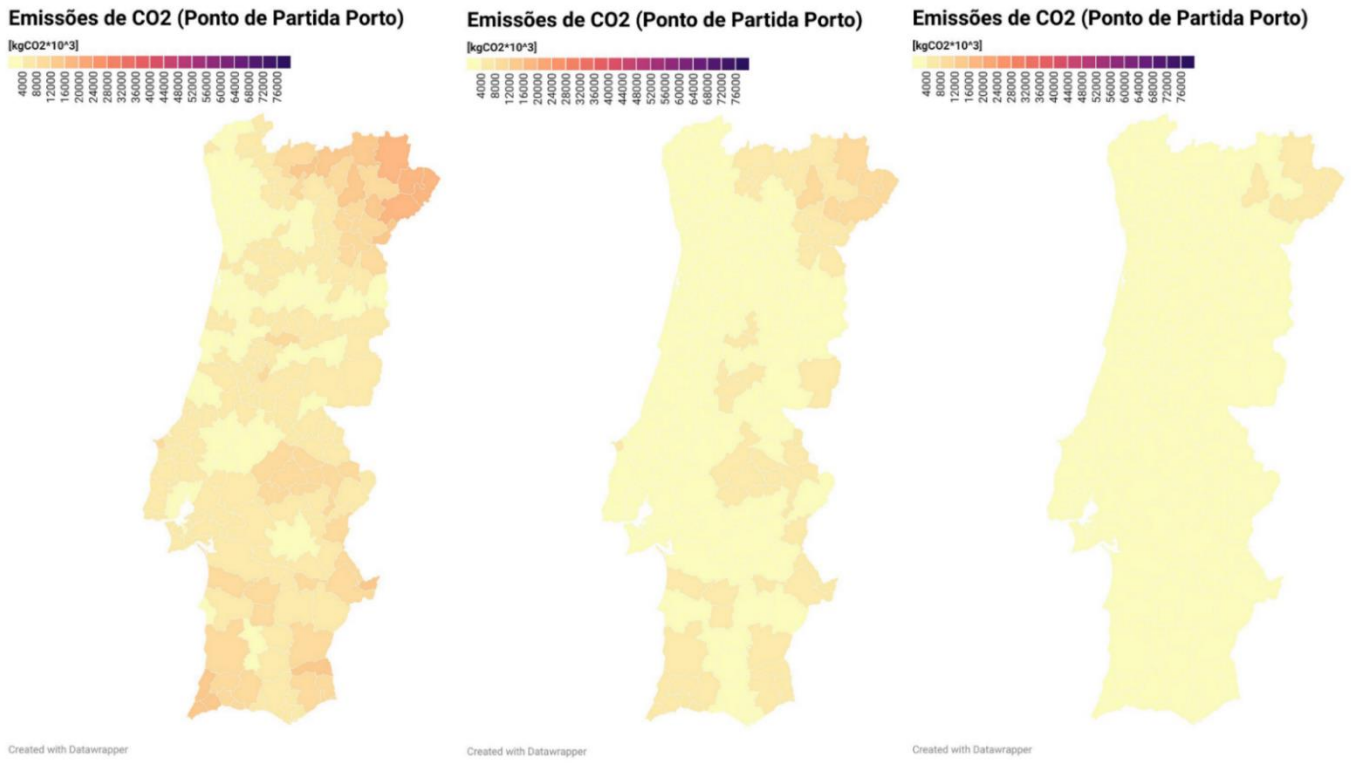


Figura 82 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

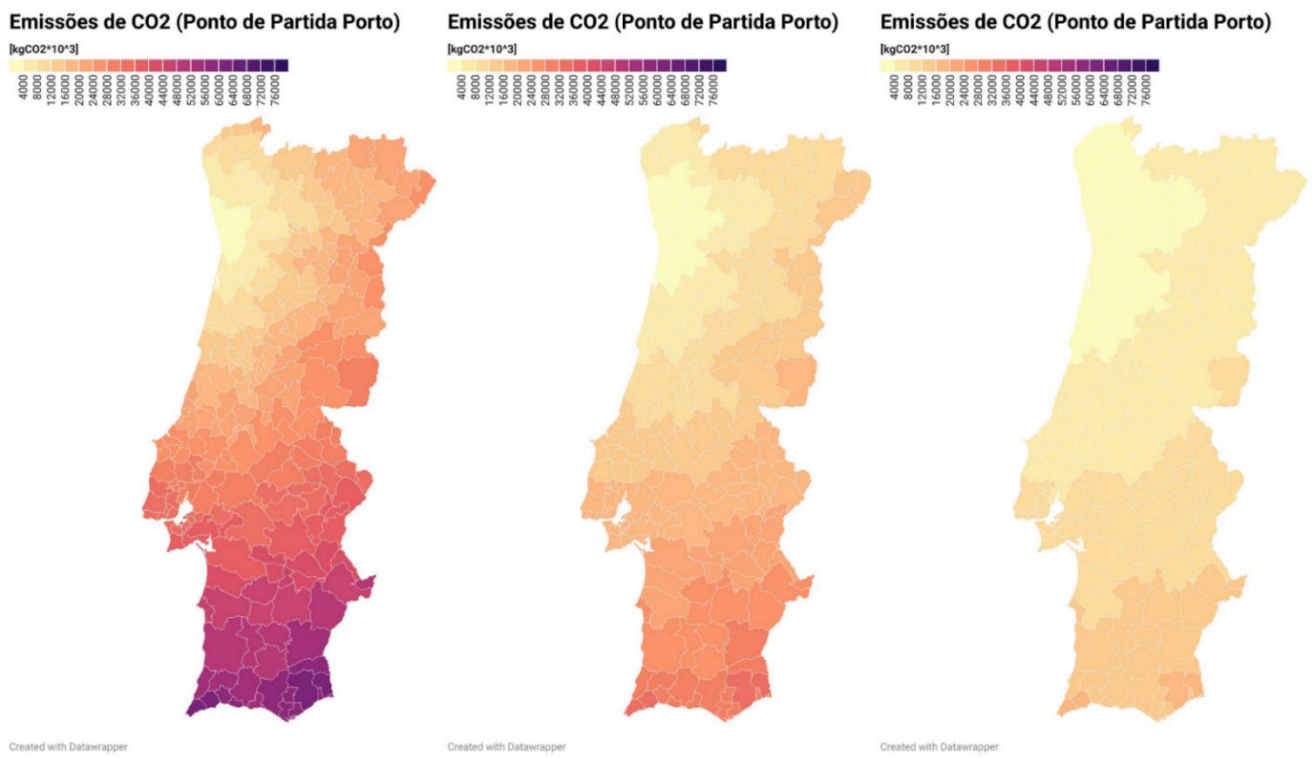


Figura 83 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Porto, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

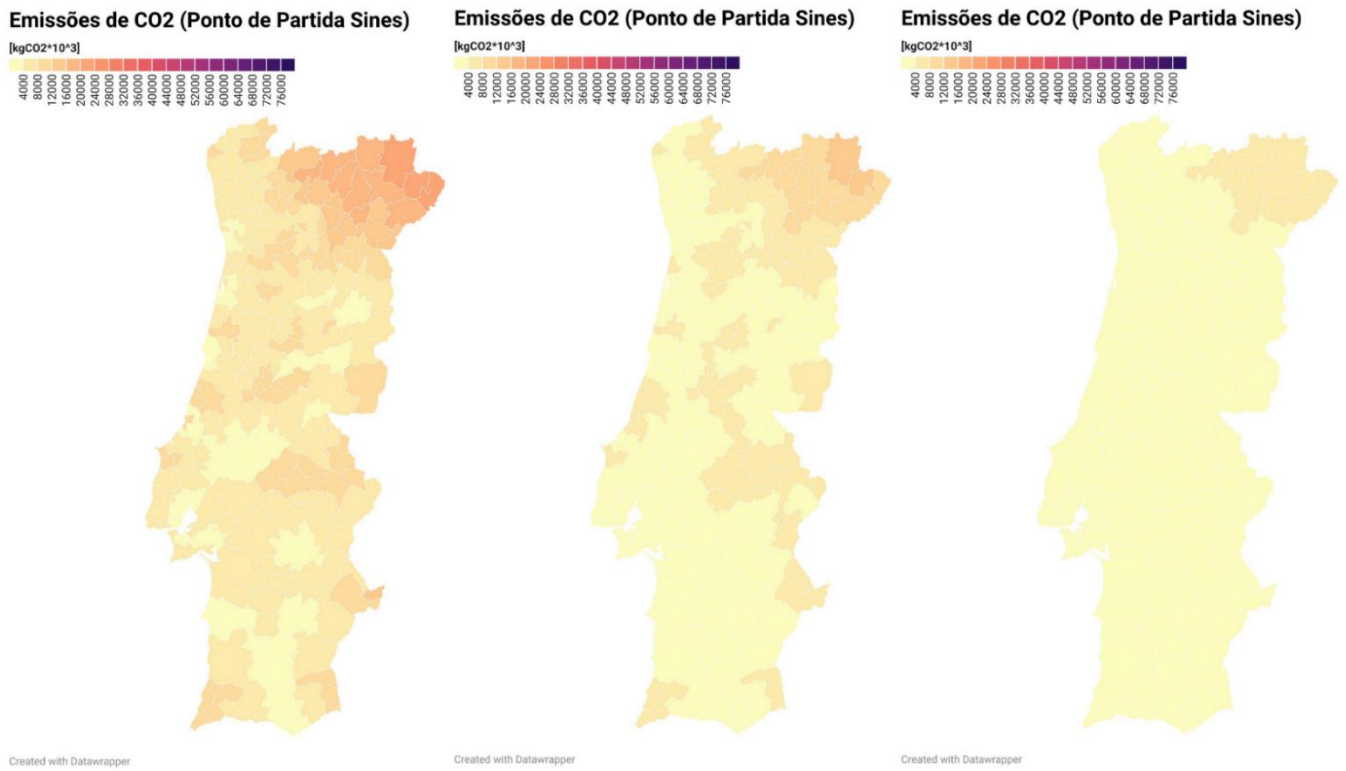


Figura 84 - Emissões de CO2 na ferrovia no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

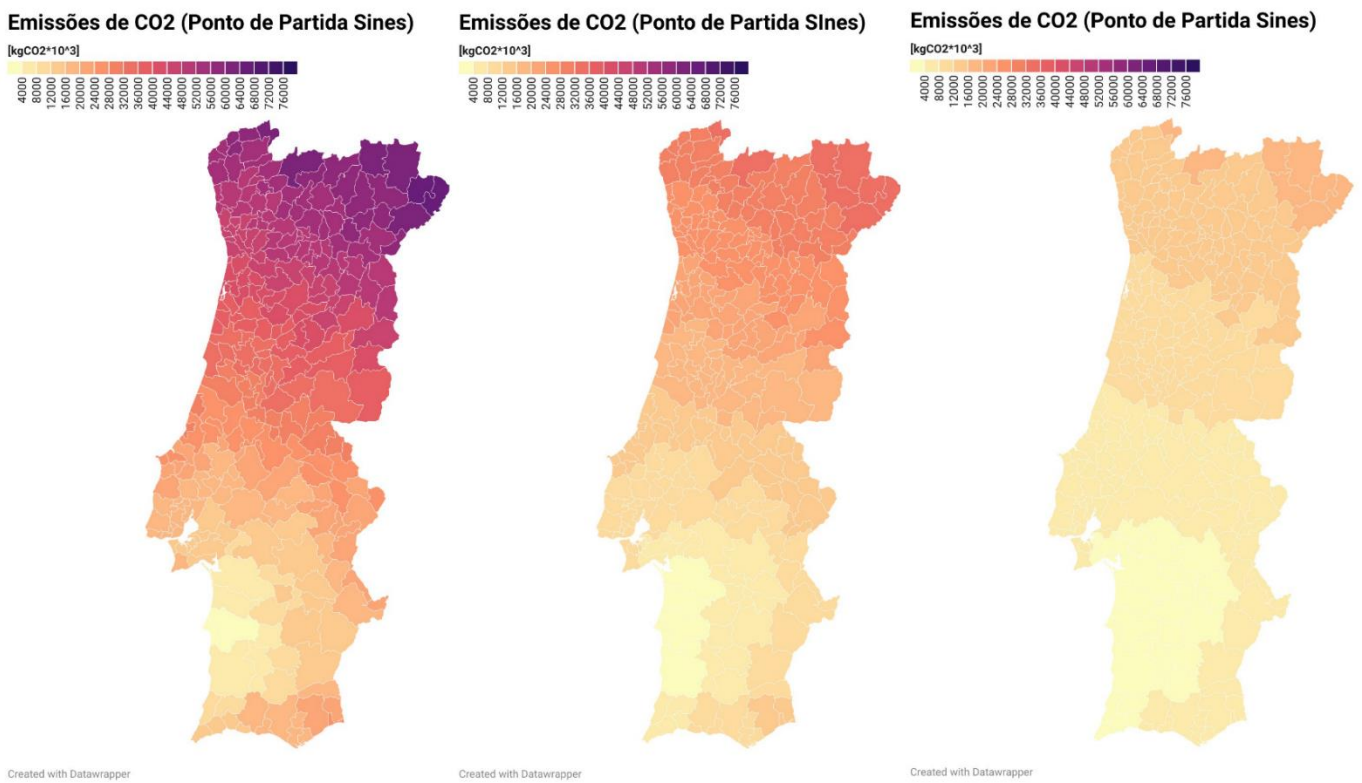


Figura 85 - Emissões de CO2 na rodovia no ano 2021 com partida de Sines, da esquerda para a direita as imagens correspondem aos cenários máximo, médio e mínimo

## 5. Conclusões

Os resultados da análise dos quatro casos de estudo abordados mostram que todos apresentam a mesma tendência. Ou seja, os casos abordados indicam a existência de benefícios em termos energéticos e de emissões de gases com efeito estufa com a introdução da ferrovia nos percursos existentes de transporte de mercadorias.

Uma conclusão que é possível retirar imediatamente é que os percursos em que existe a possibilidade de serem realizados exclusivamente através do transporte ferroviário apresentam uma razão do consumo energético e das emissões de CO<sub>2</sub> muito superiores aos percursos em que há uma maior participação do transporte rodoviário. As participações do transporte rodoviário afetam maioritariamente em termos quantitativos, mais as emissões libertadas para a atmosfera do que a energia gasta no percurso, de acordo com a Tabela 31.

Tabela 31 – Comparação dos resultados obtidos nos casos de estudo por contentor transportado

Caso de estudo	Cenário	Rota		Consumo energético [MJ]		Emissões CO <sub>2</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]		Comparação Consumo energético [Rodovia/Ferrovia]	Comparação Emissões CO <sub>2</sub> [Rodovia/Ferrovia]
		Origem	Destino	Ferrovia	Rodovia	Ferrovia	Rodovia		
I	Otimista	Sines	Leixões	2013,05	12638,53	84,35	872,47	6,28	10,34
	Médio			3657,02	25313,40	153,23	1747,44	6,92	11,40
	Pessimista			7085,48	46829,79	296,88	3232,77	6,61	10,89
II	Otimista	Lisboa	Bragança	6295,55	13870,86	399,86	957,54	2,20	2,39
	Médio			12370,79	27781,60	790,88	1917,83	2,25	2,42
	Pessimista			23089,47	51395,96	1471,65	3547,98	2,23	2,41
III	Otimista	Évora	Loulé	2044,40	6132,98	108,99	423,37	3,00	3,88
	Médio			3874,08	12283,60	209,05	847,96	3,17	4,06
	Pessimista			7355,36	22724,66	394,62	1568,73	3,09	3,98
IV	Otimista	Sines	Elvas (Portalegre)	1464,85	7050,06	61,38	486,68	4,81	7,93
	Médio			2661,12	14120,40	111,50	974,76	5,31	8,74
	Pessimista			5155,92	26122,74	216,03	1803,31	5,07	8,35
	Otimista	Sines	Elvas (Évora)	1137,85	7050,06	47,68	486,68	6,20	10,21
	Médio			2067,07	14120,40	86,61	974,76	6,83	11,25
	Pessimista			4004,95	26122,74	167,81	1803,31	6,52	10,75

A avaliação dos consumos energéticos médios e emissões médias emitidas por tonelada de mercadoria transportada para alcançar cada ponto do país a partir dos pontos escolhidos, Lisboa, Porto, Sines e Faro. As Tabela 32 e Tabela 33 demonstram que de qualquer que seja o ponto de partida e o cenário adotado, existe um gasto energético por parte do transporte ferroviário, tendo em conta que este se encontra em a conciliação com o transporte rodoviário, de no mínimo três vezes inferior ao gasto energético da utilização de apenas o transporte rodoviário. O mesmo sucede-se nas emissões produzidas, onde existe uma diminuição em pelo menos quatro vezes da quantidade de emissões, quando comparados os dois meios de transporte.

Tabela 32 - Consumo energético médio por tonelada gasto a partir de um ponto de partida

Cenário	Consumo Energético [MJ/ton]								Razão Rodovia e Ferrovia			
	Ferrovia				Rodovia							
	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro
Mínimo	52,57	49,00	66,57	75,96	173,18	154,45	229,55	298,88	329%	315%	345%	393%
Médio	100,32	93,81	125,95	143,07	346,85	309,34	459,76	598,62	346%	330%	365%	418%
Máximo	183,77	172,06	231,55	262,99	641,68	572,29	850,55	1107,45	349%	333%	367%	421%

Tabela 33 – Produção média de emissões por tonelada a partir de um ponto de partida

Cenário	Emissões Produzidas [kgCO2/ton]								Razão Rodovia e Ferrovia			
	Ferrovia				Rodovia							
	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro
Mínimo	2,89	2,76	3,50	3,87	12,44	11,10	16,49	21,48	431%	402%	471%	555%
Médio	5,61	5,34	6,71	7,40	24,92	22,23	33,04	43,01	445%	416%	492%	581%
Máximo	10,55	10,05	12,62	13,95	46,11	41,12	61,12	79,58	437%	409%	484%	570%

Se se avaliar os consumos energéticos médios e emissões médias emitidas para o transporte de mercadorias no ano de 2021, para alcançar cada ponto do país a partir dos pontos escolhidos, Lisboa, Porto, Sines e Faro, obtém-se a Tabela 34 e Tabela 35 que demonstram, tal como os mapas por tonelada transportada, uma redução de três a quatro vezes inferior no uso energético e de quatro a cinco vezes inferior na emissão de gases com efeito estufa.

Verifica-se pela análise dos mapas da rodovia e da ferrovia que o nível de consumo energético e emissões produzidas a curtas distâncias, até cerca de 100 km, é semelhante o que pode não justificar o uso da ferrovia devido às suas limitações de fazer escoar os produtos até aos destinos finais, pelo menos enquanto não existir uma solução ferroviária mais viável.

Tabela 34 - Consumo energético médio no ano 2021 gasto a partir de um ponto de partida

Cenário	Consumo Energético [MJ]								Razão Rodovia e Ferrovia			
	Ferrovia				Rodovia							
	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro
Mínimo	29563,48	27555,86	37437,46	42716,77	97392,56	86860,08	129094,20	168085,78	329%	315%	345%	393%
Médio	56419,97	52758,47	70834,83	80457,47	195065,17	173969,93	258559,61	336654,90	346%	330%	365%	418%
Máximo	103349,49	96762,26	130219,63	147899,17	360870,57	321844,38	478335,28	622811,56	349%	333%	367%	421%

Tabela 35 - Produção média de emissões no ano 2021 a partir de um ponto de partida

Cenário	Emissões Produzidas [kgCO2]								Razão Rodovia e Ferrovia			
	Ferrovia				Rodovia							
	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro	Lisboa	Porto	Sines	Faro
Mínimo	1622,82	1550,96	1967,89	2176,93	6998,10	6241,29	9276,00	12077,73	431%	402%	471%	555%
Médio	3152,93	3003,70	3773,97	4163,40	14016,32	12500,53	18578,68	24190,18	445%	416%	492%	581%
Máximo	5931,72	5649,45	7096,95	7845,44	25930,19	23125,98	34370,56	44751,84	437%	409%	484%	570%

A partir dos casos de estudo e dos mapas criados é possível verificar-se que o uso do transporte ferroviário deve ser efetivamente incentivado e aumentar a sua quota como um dos principais meios de transporte de mercadorias a nível terrestre, não só a nível nacional mas também a nível internacional onde há um gasto energético superior. O seu uso traz benefícios em termos ambientais, como a redução das emissões produzidas e a diminuição do uso de combustíveis fósseis e energéticos, mas também da impulsão da aposta nas energias renováveis.

Em contrapartida terá sempre de haver um consenso em relação ao uso da eletricidade, pois a produção desta pode ser a partir de energias renováveis como o vento e o sol ou a partir de energias não renováveis como é o caso do gás natural e o carvão. O aumento do uso da eletricidade na ferrovia pode gerar a criação de maiores necessidades elétricas. No entanto, o uso da eletricidade na ferrovia apenas consegue trazer benefícios ambientais caso esta seja produzida por vias renováveis e quanto maior for esta percentagem maior será a redução das emissões verificada no uso do transporte ferroviário de mercadorias.

O trabalho futuro a realizar para melhorar e dar continuidade a este trabalho, seria a obtenção resultados com base na realização de experiências baseadas em percursos realizados efetivamente pelos dois meios de transporte, podendo assim obter-se resultados mais fidedignos. Quanto aos mapas seria realizar os mesmos cálculos, mas tendo como base valores obtidos experimentalmente tendo em conta características do terreno como a topografia, características e consumos do veículo, em vez de a base ser em valores estimados. Seria interessante também explorar a logística envolvida nos transportes, ou seja, a influência que as viagens de retorno normalmente com menor quantidade de mercadoria têm nos dois meios de transporte.

## 6. Referências

- [1] K. Pietrzak, O. Pietrzak, e A. Montwiłł, «Light Freight Railway (LFR) as an innovative solution for Sustainable Urban Freight Transport», *Sustain Cities Soc*, vol. 66, p. 102663, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2020.102663.
- [2] J. Martinich *et al.*, «Chapter 29 : Mitigation: Avoiding and Reducing Long-term Risks. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II», 2018, doi: 10.7930/NCA4.2018.CH29.
- [3] «File:Greenhouse gas emissions by source sector, EU, 2020.png - Statistics Explained». Acedido: 10 de Dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse\\_gas\\_emissions\\_by\\_source\\_sector,\\_EU,\\_2020.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Greenhouse_gas_emissions_by_source_sector,_EU,_2020.png)
- [4] European Environment Agency., «Rail and waterborne : best for low-carbon motorised transport.», Acedido: 25 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport/rail-and-waterborne-best/#notes>
- [5] «21st Century Truck Partnership Research Blueprint | Department of Energy». Acedido: 30 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/21st-century-truck-partnership-research-blueprint>
- [6] A. Bigo, A. Bousquet, B. Lapillonne, e L. Sudries, «Transport Emissions Trends in the Europe», Set. 2022, Acedido: 10 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/transport-co2-emissions-trends.html>
- [7] J. André, *Transporte Interurbano em Portugal Conceção Técnica de uma Alternativa Ferroviária para o Transporte de Passageiros*, 2.<sup>a</sup> ed. IST Press, 2008.
- [8] M. Vajih e S. Ricci, «Energy Efficiency Assessment of Rail Freight Transport: Freight Tram in Berlin», *Energies 2021, Vol. 14, Page 3982*, vol. 14, n. 13, p. 3982, Jul. 2021, doi: 10.3390/EN14133982.
- [9] A. K. Ankur, S. Kraus, T. Grube, R. Castro, e D. Stolten, «A Versatile Model for Estimating the Fuel Consumption of a Wide Range of Transport Modes», *Energies (Basel)*, vol. 15, n. 6, p. 2232, Mar. 2022, doi: 10.3390/EN15062232/S1.
- [10] E. M. Washing e S. S. Pulugurtha, «Well-to-Wheel Analysis of Electric and Hydrogen Light Rail», *J Public Trans*, vol. 18, n. 2, pp. 74–88, Abr. 2015, doi: 10.5038/2375-0901.18.2.6.
- [11] A. Hoffrichter, A. R. Miller, S. Hillmansen, e C. Roberts, «Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 17, n. 1, pp. 28–34, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.TRD.2011.09.002.
- [12] E. Toledo, E. Polloni, W. Martins, e R. Martins, *Tração Elétrica*, 1.<sup>a</sup> ed. Siemens e Livraria Nobel, 1987.

- [13] «T is for Tank-to-wheel (TTW) | Volkswagen Newsroom». Acedido: 14 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/t-is-for-tank-to-wheel-ttw-4865>
- [14] «Well to Wheel Emissions Simplified». Acedido: 14 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.cummins.com/news/2022/05/26/well-wheel-emissions-simplified>
- [15] T. J. Mlinarić e K. Ponikvar, «Energy Efficiency of Railway Lines», *Promet - Traffic&Transportation*, vol. 23, n. 3, pp. 187–193, Mai. 2011, doi: 10.7307/PTT.V23I3.122.
- [16] A. T. Dover, *Electric Traction*, 4.<sup>a</sup> ed. 1963.
- [17] A. Quazi, T. Crouch, J. Bell, T. McGreevy, M. C. Thompson, e D. Burton, «A field study on the aerodynamics of freight trains», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 209, p. 104463, Fev. 2021, doi: 10.1016/J.JWEIA.2020.104463.
- [18] Y. C. Lai, C. P. L. Barkan, e H. Önal, «Optimizing the aerodynamic efficiency of intermodal freight trains», *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 44, n. 5, pp. 820–834, Set. 2008, doi: 10.1016/J.TRE.2007.05.011.
- [19] D. Soper, C. Baker, e M. Sterling, «Experimental investigation of the slipstream development around a container freight train using a moving model facility», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 135, pp. 105–117, Dez. 2014, doi: 10.1016/J.JWEIA.2014.10.001.
- [20] M. Meinert, P. Prenleloup, S. Schmid, e R. Palacin, «Energy storage technologies and hybrid architectures for specific diesel-driven rail duty cycles: Design and system integration aspects», *Appl Energy*, vol. 157, pp. 619–629, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.05.015.
- [21] S. Schmid, K. Ebrahimi, A. Pezouvanis, e W. Commerell, «Model-based comparison of hybrid propulsion systems for railway diesel multiple units», <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1390790>, vol. 6, n. 1, pp. 16–37, Jan. 2017, doi: 10.1080/23248378.2017.1390790.
- [22] M. Spiryagin, Q. Wu, P. Wolfs, Y. Sun, e C. Cole, «Comparison of locomotive energy storage systems for heavy-haul operation», <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1325719>, vol. 6, n. 1, pp. 1–15, Jan. 2017, doi: 10.1080/23248378.2017.1325719.
- [23] «Sistemas e rolamentos magnéticos | SKF | SKF». Acedido: 6 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/magnetic-bearings-systems>
- [24] T. Konishi, S. I. Hase, e Y. Nakamichi, «Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC», *Quarterly Report of RTRI*, vol. 45, n. 2, pp. 53–58, Mai. 2004, doi: 10.2219/RTRIQR.45.53.
- [25] K. Takizawa e K. Kondo, «A method for designing the power and capacitance of fuel cells and electric double-layer capacitors of hybrid railway vehicles», *Electrical Engineering in Japan*, vol. 184, n. 3, pp. 47–54, Ago. 2013, doi: 10.1002/EEJ.22395.

- [26] K. Pietrzak, «Analysis of the Possibilities of Using “Light Freight Railway” for the Freight Transport Implementation in Agglomeration Areas (Example of West Pomerania Province)», *Transportation Research Procedia*, vol. 16, pp. 464–472, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.TRPRO.2016.11.043.
- [27] «Decreto-Lei n.º 132/2017, de 11 de outubro | DRE». Acedido: 1 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/132-2017-108284890>
- [28] J. Ang-Olson e W. Schroeer, «Energy Efficiency Strategies for Freight Trucking. Potential Impact on Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions». Acedido: 23 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3141/1815-02>
- [29] S. Kobayashi, S. Plotkin, e S. K. Ribeiro, «Energy efficiency technologies for road vehicles», *Energy Effic*, vol. 2, n. 2, pp. 125–137, Jan. 2009, doi: 10.1007/S12053-008-9037-3/FIGURES/5.
- [30] S. C. Davis, S. E. Williams, R. G. Boundy, e S. A. Moore, «2016 Vehicle Technologies Market Report», Mai. 2017, doi: 10.2172/1361368.
- [31] H. Bínová, O. Hykš, M. Hykšová, K. Neubergová, F. Kekula, e J. Sadil, «Perspective of Clean Mobility in Road Freight Transport», *Transportation Research Procedia*, vol. 53, pp. 289–304, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TRPRO.2021.02.035.
- [32] O. Delgado, F. Rodríguez, e R. Muncrief, «Fuel eFFiciency Technology in european heavy-DuTy vehicles: Baseline anD poTenTial For The 2020-2030 Time Frame», Jul. 2017, Acedido: 10 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: [www.theicct.org](http://www.theicct.org)
- [33] «Adoption of New Fuel Efficient technologies from Supertruck». Acedido: 30 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.energy.gov/node/1859591>
- [34] «Aerodyne 101: A lesson in truck aerodynamics - Aerodyne». Acedido: 3 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://aerodyneuk.com/aerodyne-101-a-lesson-in-truck-aerodynamics/>
- [35] «Top 10 Reasons to Convert to MICHELIN® X ONE® Tire». Acedido: 3 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://business.michelinman.com/freight-transportation/x-one-tires/top-10-reasons-to-convert-to-michelin-x-one-tires>
- [36] «Detalhes técnicos das locomotivas da frota da MEDWAY». Acedido: 21 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.medway-iberia.com/pt/pages/locomotivas>
- [37] «Características técnicas dos vagões da frota da MEDWAY». Acedido: 21 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.medway-iberia.com/pt/pages/vagoes>
- [38] «Volvo Trucks». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.volvotrucks.com.pt/pt-pt/>
- [39] «Renault Trucks, uma gama completa de soluções de transporte | Renault Trucks Portugal». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.renault-trucks.pt/>
- [40] «Camiões | Scania Portugal». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.scania.com/pt/pt/home/products/trucks.html>

- [41] «DAF Portugal - DAF Trucks Portugal». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.daf.pt/pt-pt>
- [42] «IVECO Home Page». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.iveco.com/portugal/pages/homepage.aspx>
- [43] «Camiões, autocarros, carrinhas e serviços MAN | MAN PT». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.man.eu/pt/pt/pagina-inicial.html?gclid=Cj0KCQjwjt-oBhDKARIsABVRB0ypvkitP38PI-AzX9H\\_oAb3MQVTz76kwm9tluhVjYuvEuMs4Dc38TMaAifdEALw\\_wcB](https://www.man.eu/pt/pt/pagina-inicial.html?gclid=Cj0KCQjwjt-oBhDKARIsABVRB0ypvkitP38PI-AzX9H_oAb3MQVTz76kwm9tluhVjYuvEuMs4Dc38TMaAifdEALw_wcB)
- [44] «Home | Ford Trucks». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.fordtrucks.pt/>
- [45] «Página inicial - Mercedes-Benz Trucks - Trucks you can trust». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.mercedes-benz-trucks.com/pt\\_PT/home.html](https://www.mercedes-benz-trucks.com/pt_PT/home.html)
- [46] «Schmitz Cargobull». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.cargobull.com/pt>
- [47] «Home - Renders». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.renders.eu/en/>
- [48] «OKT Trailer - Curious for better». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.okt-trailer.com/>
- [49] «LAG Trailers - Reliable, no matter where». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.lag.eu/en/>
- [50] «Buy semi-trailer, used vehicles, rental, spare parts and repair». Acedido: 30 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.lecitrailier.es/en>
- [51] L. Schipper, L. Scholl, e L. Price, «Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: An analysis of trends from 1973 to 1992», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 2, n. 1, pp. 57–76, Mar. 1997, doi: 10.1016/S1361-9209(96)00014-4.
- [52] H. Hao, Y. Geng, W. Li, e B. Guo, «Energy consumption and GHG emissions from China's freight transport sector: Scenarios through 2050», *Energy Policy*, vol. 85, pp. 94–101, Out. 2015, doi: 10.1016/J.ENPOL.2015.05.016.
- [53] I. López, J. Rodríguez, J. M. Burón, e A. García, «A methodology for evaluating environmental impacts of railway freight transportation policies», *Energy Policy*, vol. 37, n. 12, pp. 5393–5398, Dez. 2009, doi: 10.1016/J.ENPOL.2009.07.060.
- [54] A. L. Merchan, S. Belboom, e A. Léonard, «Life cycle assessment of rail freight transport in Belgium», *Clean Technol Environ Policy*, vol. 22, n. 5, pp. 1109–1131, Jul. 2020, doi: 10.1007/S10098-020-01853-8/FIGURES/5.
- [55] S. Lakušić -Editor, «Road and Rail Infrastructure III», 2014. Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://repositorij.grad.unizg.hr/en/islandora/object/grad%3A710/datastream/FILE0/view#page=810>

- [56] B. Dalla Chiara, D. De Franco, N. Coviello, e D. Pastrone, «Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 52, pp. 227–243, Mai. 2017, doi: 10.1016/J.TRD.2017.02.006.
- [57] A. Pomykala e A. Szelag, «Reduction of Power Consumption and CO2 Emissions as a Result of Putting into Service High-Speed Trains: Polish Case», *Energies 2022, Vol. 15, Page 4206*, vol. 15, n. 12, p. 4206, Jun. 2022, doi: 10.3390/EN15124206.
- [58] «STREAM Freight Transport 2020 - CE Delft - EN». Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://cedelft.eu/publications/stream-freight-transport-2020/>
- [59] M. Janic e J. Vleugel, «Estimating potential reductions in externalities from rail–road substitution in Trans-European freight transport corridors», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 17, n. 2, pp. 154–160, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.TRD.2011.09.015.
- [60] B. Lapillonne, «Energy efficiency issues and indicators in transport in the European Union». 2000. Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20354450>
- [61] I. Energy Agency, «The Future of Trucks Implications for energy and the environment Second edition», Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a4710daf-9cd2-4bdc-b5cf-5141bf9020d1/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf>
- [62] M. R. Ghaffariyan e M. Acuna, «A short review of timber truck fuel consumption studies», 2018, Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322974879>
- [63] C. Rizet, C. Cruz, e M. Mbacké, «Reducing Freight Transport CO2 Emissions by Increasing the Load Factor», *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 48, pp. 184–195, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.SBSPRO.2012.06.999.
- [64] «Fator de Emissão da Eletricidade 2023 Portugal», Lisboa, Mar. 2023. Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Inventarios/20230427/FE\\_GEE\\_Eletricidade2023rev3.pdf](https://www.apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20230427/FE_GEE_Eletricidade2023rev3.pdf)
- [65] «www.ChemistryIsLife.com - The Chemistry of Diesel Fuel». Acedido: 25 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.chemistryislife.com/the-chemistry-of-dies>
- [66] «Diesel vs Petrol - Difference and Comparison | Diffen». Acedido: 25 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.diffen.com/difference/Diesel\\_vs\\_Petrol](https://www.diffen.com/difference/Diesel_vs_Petrol)
- [67] «Heat values of various fuels - World Nuclear Association». Acedido: 25 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- [68] C. Brauer e P. Scholten, «Methodology for GHG Efficiency of Transport Modes Final Report», 2020, Acedido: 20 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://www.isi.fraunhofer.de>

- [69] M. A. Weiss e J. B. Heywood, «On the Road in 2020, a Life-Cycle Analysis of New Automobile Technologies», p. 47, 2000, Acedido: 25 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://indico.ictp.it/event/8008/session/3/contribution/23/material/slides/2.pdf>
- [70] «Box plot: o que é e para que serve? - OPENCADD». Acedido: 23 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://opencadd.com.br/box-plot-o-que-e-e-para-que-serve/>
- [71] «Como interpretar (e construir) um gráfico boxplot? | Fernanda Peres | Estatística aplicada». Acedido: 23 de Junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://fernandafperes.com.br/blog/interpretacao-boxplot/>
- [72] «Terminais de Mercadorias | Infraestruturas de Portugal». Acedido: 29 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/parceiros/operacao-ferroviaria/os-nossos-servicos/terminais-de-mercadorias-ips>
- [73] «Mapas de rede da MEDWAY para transporte de mercadorias». Acedido: 29 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.medway-iberia.com/pt/pages/mapas-de-rede>
- [74] «Diretório da Rede 2023», pp. 1–148, Dez. 2021, Acedido: 29 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/inline-files/Diret%C3%B3rio%20da%20Rede%202023.pdf>
- [75] «Rede Ferroviária | Infraestruturas de Portugal». Acedido: 29 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/infraestruturas/rede-ferroviaria>
- [76] «ViaMichelin: Itinerários, Mapas, Info tráfego, Hotéis». Acedido: 23 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.viamichelin.pt/>
- [77] «Google Maps». Acedido: 23 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.google.com/maps/dir///@40.6220143,-8.6383223,143524m/data=!3m1!1e3?hl=pt-PT&entry=ttu>
- [78] «Road freight transport by journey characteristics - Statistics Explained». Acedido: 31 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road\\_freight\\_transport\\_by\\_journey\\_characteristics&oldid=583882#Road\\_freight\\_transport\\_performance\\_by\\_type\\_of\\_operation\\_.28in\\_tonne-kilometres.29](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_by_journey_characteristics&oldid=583882#Road_freight_transport_performance_by_type_of_operation_.28in_tonne-kilometres.29)
- [79] «Dimensões e tipos de contentores». Acedido: 31 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.educargas.pt/pt/info/informacoes/contentores>
- [80] «Totalplanporto». Acedido: 31 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.totalplanporto.pt/contentores.php>
- [81] «Contentores de Cargas [Guia] - Transporteca». Acedido: 31 de Maio de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://transporteca.pt/contentores-de-cargas/>
- [82] «Combustível Diesel | Propriedades, Preço e Aplicação | Propriedades do Material». Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://material-properties.org/pt-br/combustivel-diesel-tabela-de-materiais-aplicacoes-preco/>

- [83] «Fossil and Alternative Fuels - Energy Content». Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.engineeringtoolbox.com/fossil-fuels-energy-content-d\\_1298.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fossil-fuels-energy-content-d_1298.html)
- [84] «Create a map - Datawrapper». Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://app.datawrapper.de/select/map>
- [85] «Statistics Portugal - Web Portal». Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=16909661&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=16909661&PUBLICACOESmodo=2)
- [86] «Municípios: População residente: total e por grandes grupos etários | Pordata». Acedido: 26 de Agosto de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.pordata.pt/municipios/populacao+residente+total+e+por+grandes+grupos+etarios-390>