

2º CICLO
ECONOMIA E GESTÃO DO AMBIENTE

A MOBILIDADE URBANA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. O CASO DO METRO DO PORTO.

Bruno Filipe Vilela Magalhães

M

2019



A MOBILIDADE URBANA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. O CASO
DO METRO DO PORTO.

Bruno Filipe Vilela Magalhães

Dissertação
Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

Orientado por
Professora Doutora Maria Isabel Rebelo Teixeira Soares

2019

Agradecimentos

À Professora Isabel Soares pela orientação e conhecimento partilhado, assim como pela prontidão e simpatia com que sempre fui recebido que foram determinantes para a realização da presente dissertação.

À Metro do Porto, e em especial ao Gabinete de Ambiente, Segurança e Qualidade, pela experiência, apoio incondicional e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de mestrado pelos bons momentos passados e partilha de conhecimento.

Aos meus amigos que sempre me acompanharam ao longo dos anos.

Aos meus pais e irmãos pela educação e valores transmitidos que me tornaram na pessoa que sou hoje.

Por último, mas não menos importante, à Carolina por ser a minha companheira nesta longa viagem, pelo carinho, compreensão e, acima de tudo, por acreditar em mim.

Resumo

A mobilidade urbana representa um dos principais motores de desenvolvimento da economia. Contudo, face ao atual crescimento e concentração populacional nas cidades interligado com o aumento do transporte individual, as condições de mobilidade têm sofrido uma degradação provocando prejuízos económicos e diminuição da qualidade de vida. Essa degradação é causada, essencialmente, pelo aumento do congestionamento, do ruído, da poluição atmosférica e do tempo das viagens. A mobilidade urbana representa, assim, um dos grandes desafios do presente.

O transporte energeticamente eficiente oferece um enorme potencial para reduzir a procura tanto por petróleo quanto por energia. Esta redução oferece vários benefícios, como a diminuição da dependência do petróleo, do consumo de energia e da poluição atmosférica, contribuindo para um sistema de transportes sustentável.

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar e analisar os fatores que explicam a variação da eficiência energética, isto é, a energia de tração consumida por passageiro por quilómetro, do Metro do Porto para um horizonte temporal de 2004 a 2018.

Para tal, utilizou-se uma análise de regressão, mais especificamente, uma regressão linear múltipla, em que foram utilizadas como variáveis explicativas o número de estações, a taxa de ocupação e o número de veículos por quilómetro.

Os resultados permitiram concluir que o número de estações contribuí para a diminuição da eficiência energética, ao contrário que a taxa de ocupação e o número de veículos por quilómetro contribuem para o seu aumento.

Palavras-chave: Mobilidade Urbana; Sustentabilidade; Eficiência Energética; Metro do Porto

Abstract

Urban mobility represents one of the main engines of economic development. However, given the current growth and population concentration in cities, linked to the increase in individual transport, mobility conditions have been degraded leading to economic losses and reduced quality of life. This degradation is essentially caused by increased congestion, noise, air pollution and travel time. Urban mobility thus represents one of the great challenges of the present.

Energy-efficient transport offers a massive potential to reduce demand for both oil and energy. This reduction offers several benefits, such as reduced dependence on oil, energy consumption and air pollution, contributing to a sustainable transport system.

The main objective of this dissertation is to study and analyze the factors that explain the variation of energy efficiency, that is, the traction energy consumed per passenger per kilometre, from the Porto's Metropolitan for a timeline from 2004 to 2018.

For this, a regression analysis was used, more specifically, a multiple linear regression, in which the number of stations, the occupancy rate and the number of vehicles per kilometre were used as explanatory variables.

The results show that the number of stations contributes to the reduction of energy efficiency, while the occupancy rate and the number of vehicles per kilometre contributes to its increase.

Key words: Urban Mobility; Sustainability; Energy Efficiency; Metro of Porto

Lista de Acrónimos

ACEA – *European Automobile Manufacturers' Association* (Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis)

AML – Área Metropolitana de Lisboa

AMP – Área Metropolitana do Porto

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ASI – *Avoid - Shift - Improve* (Evitar – Mudar – Melhorar)

CCV – Compromisso para o Crescimento Verde

CO₂ – Dióxido de carbono

CO_{2eq} – Dióxido de carbono equivalente

dB - Decibéis

EEA – *European Environment Agency* (Agência Europeia do Ambiente)

ENAAC – Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas

ENEI – Estratégia Nacional de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente

EST – Número de estações

ETRACAO – Energia de tração

ETRACAO_PKM – Energia de tração por passageiro*km

EXT – Extensão

GEE – Gases com Efeito de Estufa

INE – Instituto Nacional de Estatística

INERPA – Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas)

L_{den} – Indicador de ruído para o período diurno-entardecer-noturno

LIN – Número de linhas

LULUCF – *Land Use, Land Use Change and Forestry* (Uso do solo, Alteração do uso do solo e Florestas)

Mt – Megatonelada

OE – Observatório da Energia

PAX – Passageiros

PKM – Passageiros*km

PM – Percurso médio

PNAC – Plano Nacional para as Alterações Climáticas

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
QEPiC – Quadro Estratégico para a Política Climática
 R^2 – Coeficiente de determinação
 R^2_{ajustado} – Coeficiente de determinação ajustado
RNC2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
SNIERPA – Sistema Nacional de Inventário de Emissões por Fontes e Remoções por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos
SPeM – Sistema Nacional para Políticas e Medidas
TI – Transporte individual
TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação
TP – Transporte público
TXOCUP – Taxa de ocupação
UE – União Europeia
UIC – *International Union of Railways* (União Internacional de Caminhos de Ferro)
UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas)
VIF – *Variance Inflation Factor* (Fator de Inflação da Variância)
VKM – Veículos*km
WCED – *United Nations World Commission on Environment and Development* (Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento)
WHO – *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)

Índice

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Lista de Acrónimos	iv
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas	viii
I. Introdução.....	1
II. Estado da Arte	6
1. O paradigma da Mobilidade Urbana.....	6
2. Principais impactes do Setor dos Transportes.....	8
2.1 Consumo Energético	9
2.2 Emissões de Gases com Efeito de Estufa.....	12
2.3 Poluição Sonora	15
2.4 Congestionamentos, ocupação de espaço e acidentes.....	16
3. Mobilidade Sustentável.....	17
4. A eficiência energética e a sustentabilidade dos transportes.....	22
4.1 A estratégia “ <i>Avoid/Reduce</i> ” (Evitar/Reduzir) – Eficiência do sistema.....	24
4.2 A estratégia “ <i>Shift</i> ” (Mudar) – Eficiência das viagens	24
4.3 A estratégia “ <i>Improve</i> ” (Melhorar) – Eficiência do veículo.....	25
4.4 Externalidade positivas	26
4.5 Tipos de instrumentos políticos	28
III. Metodologia	31
1. Breve descrição do Metro do Porto, S.A.....	31
2. Seleção das variáveis.....	33
3. Período temporal.....	36
4. Modelo.....	36
4.1. Variáveis estacionárias	38
4.2. Multicolinearidade	39
4.3. Validação do modelo.....	39
4.3.1. Análise dos resíduos	40
4.3.1.1. Autocorrelação dos resíduos.....	40
4.3.1.2. Heterocedasticidade	40
4.3.1.3. Distribuição normal dos resíduos	40
4.3.2. Teste de significância global.....	40

4.3.3. Coeficiente de determinação.....	41
4.3.4. Teste de significância individual.....	42
IV. Análise dos resultados	43
V. Conclusão	48
Apêndices.....	50
Bibliografia	54
Anexo	62

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo do transporte urbano	7
Figura 2 - Consumo de energia final por setor na UE.....	9
Figura 3 - Consumo de energia final por modo de transporte na UE.....	10
Figura 4 - Consumo de energia final por setor em Portugal.....	11
Figura 5 - Consumo de energia final por modo de transporte em Portugal.....	12
Figura 6 - Emissões de GEE na UE por setor (2016)	13
Figura 7 - Emissões de GEE em Portugal por setor (2016)	14
Figura 8 - Evolução das Emissões de GEE no setor dos transportes em Portugal (1990- 2016).....	14
Figura 9 - N.º de pessoas expostas a níveis de ruído acima de 55 dB na Europa.....	15
Figura 10 - N.º de pessoas expostas a níveis de ruído acima de 55 dB em Portugal.....	16
Figura 11 - Sistema de transporte urbano eficiente	23
Figura 12 – Externalidades positivas do transporte sustentável.....	28
Figura 13 - Rede do Metro do Porto	32
Figura 14 - <i>Eurotram</i> à esquerda e <i>Traintram</i> à direita	33
Figura 15 - Consumo de energia pelo espaçamento entre estações	35
Figura 16 - Variáveis explicativas	38
Figura 17 - Taxa de ocupação vs Energia de tração	44
Figura 18 - Taxa de ocupação vs Energia de tração por passageiro*km	44
Figura 19 - Número de veículos e percurso médio	45
Figura 20 - Evolução da Procura.....	46
Figura 21 - Número de veículos por quilómetro	47

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Designação das variáveis e fonte de dados.....	37
Tabela 2 – <i>P-values</i> e significância estatística das variáveis explicativas.....	42

I. Introdução

O conceito de mobilidade é, atualmente, um dos pilares da economia mundial (ENEI, 2013). A mobilidade de pessoas, mercadorias e informação são fundamentais para o desenvolvimento económico e social, os deslocamentos, a produção e distribuição de bens e serviços e, até mesmo, o fornecimento de energia. Cada movimento tem um propósito, uma génese e um destino (Rodrigue *et al*, 2017).

Nos últimos anos, o número de viagens cresceu dramaticamente, sendo praticamente incomportável, tendo em conta a escassez de recursos, destacando os recursos energéticos (Banister, 2011a). Desta forma, é necessário, tendo em vista a redução dos consumos de energia, reavaliar a mobilidade no Setor dos Transportes (Banister, 2011a). Todavia, importa realçar que os combustíveis fósseis continuam a ser os maiores impulsionadores da economia mundial, nomeadamente, o Setor dos Transportes que, associado a infraestruturas adequadas, permitem a realização, de uma forma mais expedita e a um custo reduzido, a maioria das viagens que os passageiros necessitam de realizar (Ribeiro e Mendes, 2017). No entanto, esta mobilidade, fomentada pelo carbono, afeta, por vezes, de um modo irreversível, os diversos ecossistemas do planeta traduzindo-se em fenómenos associados às alterações climáticas, sendo necessário alterar este paradigma e caminhar para uma mobilidade mais sustentável, eficiente e descarbonizada (Banister, 2011b).

Segundo Redman *et al.* (2013) o uso do transporte individual (TI), especialmente em áreas urbanas, é um dos principais problemas para o desenvolvimento sustentável no Setor dos Transportes. Assim, uma mudança de paradigma da mobilidade das pessoas tendo em vista a redução do uso do TI assenta em questões que ultrapassam a eficiência económica, nomeadamente, ao nível da redução da necessidade de viagens (substituição), medidas políticas de transportes (transferência modal) e uso do solo e ordenamento do território (redução das distâncias) e, por fim, inovação tecnológica (aumento da eficiência) (Banister, 2008; Faherty e Morrissey, 2014 citado em Ribeiro e Mendes, 2017).

De acordo com Berger *et al.* (2014) o atual sistema de mobilidade no mundo moderno é insustentável, uma vez que este leva à poluição, origina problemas de segurança e consome uma parcela significativa dos recursos energéticos. Face a esta realidade, as questões da mobilidade e, especialmente, da mobilidade sustentável estão no centro das preocupações, sendo fundamentais para o cumprimento das metas impostas pelos acordos internacionais e

nacionais, nomeadamente, ao nível da redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), ao aumento do recurso às energias renováveis e ao aumento da eficiência energética.

Atualmente, as alterações climáticas constituem um dos maiores desafios com que se confronta hoje a humanidade, pondo em causa o tão desejado desenvolvimento sustentável (Comissão Europeia, 2017). Em 2015, o mundo reconheceu que futuro do planeta está em risco quando se alcançou um acordo verdadeiramente histórico sobre as alterações climáticas. A propósito da Comissão Europeia (2017), como sublinhou o celebrado Acordo de Paris, a transição para uma sociedade moderna e hipocarbónica é não só indispensável, como também possível. O Acordo de Paris visa alcançar, até 2050, a descarbonização das economias mundiais, estabelecendo o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2°C e estabelecer esforços para limitar esse aumento em 1,5°C, perfilhando que isso reduzirá expressivamente os riscos e impactos das alterações climáticas (UNFCCC, 2015).

Além do que foi determinado pelo Acordo de Paris, a nível da União Europeia (UE) existe um conjunto de medidas e políticas de combate às alterações climáticas, à promoção eficiência energética e ao desenvolvimento sustentável. Como notado, por forma a evitar o agravamento das alterações climáticas, a comunidade internacional decidiu que a temperatura média do planeta não deve aumentar mais do que 2°C em relação aos valores registados na era pré-industrial. A UE, face a essa realidade, está empenhada em reduzir as emissões de GEE dos Estados-Membros, em incentivar outros grandes poluidores a agir com determinação e em fazer face às consequências de um clima em constante mutação (Comissão Europeia, 2014).

Esta problemática já havia surgido antes do Acordo de Paris: o tema “alterações climáticas e a energia” é um dos cinco temas principais da Estratégia Europa 2020 para um Crescimento Inteligente, Sustentável e Inclusivo (Comissão Europeia, 2010). Os objetivos apresentados têm o intuito de assegurar que, até 2020, se efetue a redução das emissões de GEE na UE em, pelo menos, 20% em relação aos níveis de 1990, aumento para 20% a energia proveniente de fontes renováveis no consumo da UE e melhorar a eficiência energética com o objetivo de diminuir em 20% o consumo de energia primária, em relação aos níveis previstos (Comissão Europeia, 2010). Com o pressuposto que grandes economias se comprometam a assumir esforços necessários para reduzir as emissões a nível mundial a UE propôs aumentar de 20% para 30% o seu objetivo de redução das emissões até 2020

(Comissão Europeia, 2014). Em outubro de 2014, a UE reformulou os objetivos em matéria de clima e energia para 2030, estabelecendo então uma redução de 40% das emissões de GEE em relação aos níveis registados em 1990, uma quota mínima para as energias renováveis em cerca de 27% e o aumento mínimo de 27% da eficiência energética (Comissão Europeia, 2014).

Tendo uma visão de longo prazo, estes esforços terão de ser reforçados para se conseguir cortes mais significativos e evitar o aumento das alterações climáticas. Face a isso, a EU está determinada a reduzir as suas emissões, até 2050, em 80 a 95% em relação aos níveis de 1990 (Comissão Europeia, 2011; Comissão Europeia, 2014).

A nível nacional, as respostas políticas e institucionais, em matéria de Alterações Climáticas, encontram-se no Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC). Neste quadro estratégico encontram-se os principais instrumentos de política nacional, nas vertentes de mitigação e adaptação às alterações climáticas, sendo eles: o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030) e a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAC 2020) nas vertentes de mitigação e adaptação às alterações climáticas (Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015, APA, s.d.).

O QEPiC tem o objetivo de assegurar a visão e os objetivos nacionais aos compromissos já assumidos para 2020 e propostos para 2030 no âmbito da UE e, a nível nacional, do Compromisso para o Crescimento Verde (CCV), estabelecendo um quadro estruturado de instrumentos de política climática no horizonte 2020/2030. Este instrumento é composto pelo: Sistema Nacional para Políticas e Medidas (SPeM) e o Sistema Nacional de Inventário de Emissões por Fontes e Remoção por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos (SNIERPA), assim como o sistema de reporte previsto no âmbito da ENAAC 2020 (APA, s.d.).

As políticas públicas sobre as alterações climáticas representam um papel importante, estando integradas nos diversos pacotes das políticas setoriais em Portugal. Neste contexto, importa referir a importância de um conjunto de instrumentos adicionais, tais como, o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) e o Programa para a Mobilidade Elétrica em Portugal, para a redução das emissões (Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015).

O Setor dos Transportes desempenha um papel preponderante no cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris, das Estratégias/Políticas Europeias e Nacionais. Em 2016, as emissões de GEE proveniente do setor dos transportes na UE aumentaram 18% em relação ao ano de 1990. Além disso, o consumo de combustíveis fósseis nos transportes é responsável por 21% das emissões totais de GEE na Europa em 2016, representando, assim, a segunda maior fonte de emissões a seguir ao setor da energia (Eurostat, 2018).

O papel das cidades e áreas urbanas para o desenvolvimento sustentável tornou-se mais proeminente. As grandes cidades desenvolveram-se, e agora a maioria dessas cidades, contendo mais de 10 milhões de habitantes, podem ser encontradas no mundo em desenvolvimento (Jeekel, 2017). Globalmente, mais pessoas vivem em áreas urbanas do que em áreas rurais, com 55% da população mundial residindo em áreas urbanas em 2018. Em 2050, é projetado que, cerca de 68% da população mundial irá residir em áreas urbanas (Nações Unidas, 2018).

Segundo Sobrino e Monzon (2013), a chave para a descarbonização da mobilidade urbana reside nos transportes públicos. A transferência modal representa um fator importante na estabilização da pegada carbónica da mobilidade urbana. Além disso, as estratégias de baixo carbono e eficiência energética devem focar-se não só nas viagens de longa distância, assim como, nos movimentos pendulares urbanos, já que estes representam cerca de 40% das emissões a nível urbano e com uma tendência crescente nos últimos anos.

A implementação do conceito de “*Smart City*” (Cidade inteligente), segundo demonstra Zawieska e Pieriegud (2018), pode contribuir significativamente para a redução adicional das emissões de GEE relacionadas com o transporte em áreas urbanas. No entanto, a descarbonização do Setor dos Transportes depende de vários outros fatores, e as emissões futuras podem diferir significativamente dependendo das ações empreendidas.

Questões relacionadas com o ambiente, eficiência energética e desenvolvimento tecnológico são fundamentais no Setor dos Transportes. Trata-se de um setor que depende fortemente do petróleo e derivados, que representam grande parte das suas necessidades energéticas, sendo bastante elevadas as suas emissões de CO₂. Reduzir esta dependência constitui uma necessidade ecológica e um grande desafio tecnológico (ENEI, 2013).

Para Portugal conseguir atingir a neutralidade carbónica, até 2050, conforme propõe o Acordo de Paris, dado os resultados do INERPA (APA, 2018a) referente ao sequestro de

GEE (LULUCF), seria necessário reduzir as emissões de 67,8 Mt CO₂eq para 5,4 Mt CO₂eq em 2050. Para alcançar este objetivo, Portugal enfrenta um desafio de reduzir as suas emissões em 92% nos próximos 32 anos. O Setor da Energia, e em particular a Produção de Energia e os Transportes, irá desempenhar um papel extremamente importante para a neutralidade carbónica do país (Seixas *et al.*, 2017).

A ambição e o compromisso de Portugal, para alcançar a neutralidade carbónica, é concretizada no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), que tem como objetivo principal a apoiar a transição para uma economia neutra em carbono até 2050 (República Portuguesa, 2017; Resolução do Conselho de Ministros n.º 160/2017).

O RNC2050 irá focar-se em quatro componentes sectoriais (os principais responsáveis pelas emissões de GEE e pelo sequestro de carbono: a Energia, Transportes, Resíduos e Agricultura, Florestas e Uso do Solo, que terão suporte de três componentes transversais, sendo eles os Cenários Socioeconómicos, a Economia Circular e o envolvimento da Sociedade (República Portuguesa, 2017; RNC2050, 2018).

É neste contexto que surge o presente projeto de investigação. Deste modo, o objetivo primordial da presente dissertação é obter uma resposta para a seguinte questão de investigação: **O que explica a variação da eficiência energética do Metro do Porto?**

A presente dissertação será estruturada em 5 capítulos: o capítulo I (a presente Introdução), seguida do Capítulo II onde será efetuada a revisão da literatura dos conceitos e temáticas mais pertinentes, nomeadamente, as questões e problemática da mobilidade, no contexto da UE e Portugal. O capítulo III consiste na apresentação do caso de estudo e metodologia de análise. O capítulo IV irá, essencialmente, consistir nos resultados obtidos e sua discussão. Por fim, no capítulo V, serão apresentadas as principais conclusões do trabalho, assim como, as principais limitações e dificuldades, finalizando com linhas de orientação para trabalhos futuros.

II. Estado da Arte

1. O paradigma da Mobilidade Urbana

Desde o início da história humana, o transporte tem sido um motor de crescimento. Economias modernas não poderiam funcionar sem os bens e serviços fornecidos por automóveis, camiões, comboios (de alta velocidade ou não) e aviões (Greene e Wegener, 1997).

O movimento de pessoas e bens tem sido fundamental para o desenvolvimento das sociedades. Embora a maneira como as viagens são feitas e as distâncias percorridas tenham mudado com os avanços tecnológicos, a dependência do transporte para apoiar as atividades diárias, para conhecer pessoas e realizar atividades de carácter económico e social, ainda é significativa. O Setor dos Transporte é um pouco diferente de outros setores, na medida em que é um produto da necessidade de outra atividade, como fazer compras, ter acesso a educação e trabalho. Por outras palavras, o transporte é considerado uma "procura derivada". O transporte não é um bem homogéneo, o comportamento e preferências individuais moldam um padrão espaço temporal único para cada usuário de transporte (Bongardt *et al*, 2013).

Numa era de globalização crescente, um sistema de transporte eficiente é essencial para o bom funcionamento da economia moderna industrializada. A mobilidade e, em particular, a acessibilidade a pessoas, bens e serviços são preponderantes para assegurar o bem-estar social das populações (Caid *et al*, 2002). Atualmente, grande parte da população do planeta reside em cidades e áreas urbanas com grande densidade ocupacional. Face a esta realidade, e ao seu expectável aumento, as necessidades de mobilidade tornaram-se cada vez maiores, o que levou a que o sistema atual de transportes se tornar-se insustentável.

Este crescimento apresenta consideráveis desafios de planeamento e gestão para a variedade dos setores urbanos, como habitação, saneamento, água e transporte. Um requisito básico e fundamental, tanto para os países em desenvolvimento, como para os países desenvolvidos, é que estes se desenvolvam. Em outras palavras, esperasse que a urbanização seja acompanhada pelo desenvolvimento económico. O transporte desempenha, claramente, um papel importante na facilitação para atingir esse fim. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento estimula adicionalmente a procura por transporte, o que, por sua vez, origina impactes económicos, sociais e ambientais (Figura 1) (Zebras, 2005).

Em suma, a urbanização contínua e o crescimento económico irão traduzir-se num incremento dos fluxos de pessoas e bens. Face a tal crescimento, os sistemas de transporte urbano devem equilibrar duas básicas necessidades. Por um lado, é necessário contribuir para o desenvolvimento económico e o bem-estar humano. Por outro lado, é necessário mitigar os efeitos negativos dos transportes, tanto atuais, como a poluição e os acidentes, assim como os futuros, visto que estes contribuem para o agravamento das alterações climáticas e o potencial esgotamento dos recursos não renováveis (Zebras, 2005; Bergel *et al*, 2014).

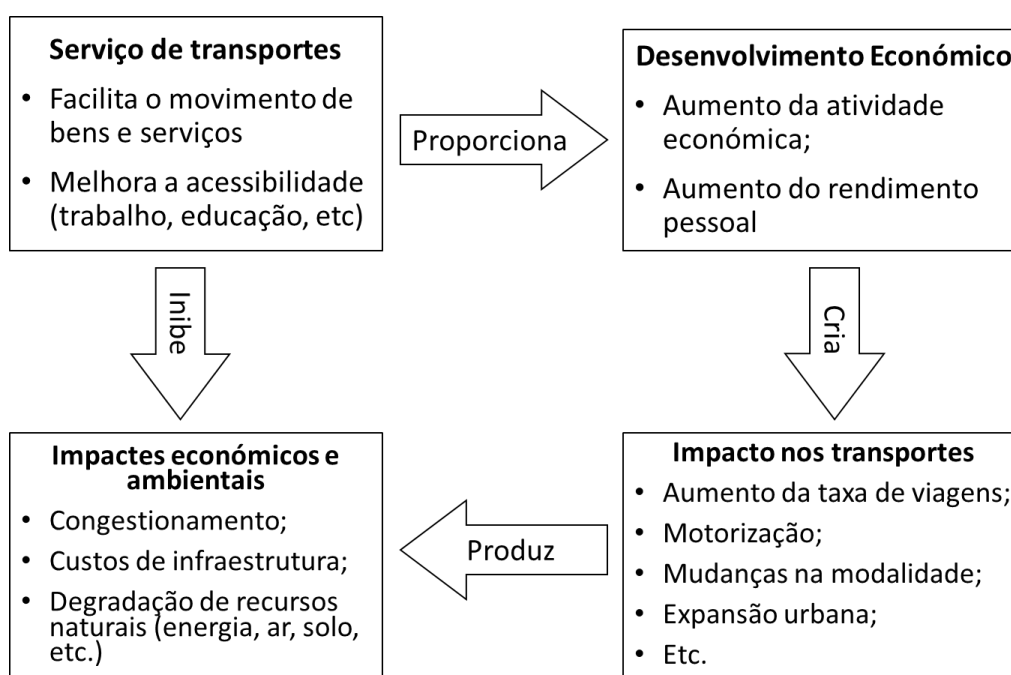


Figura 1 - Ciclo do transporte urbano (adaptado de: Zebras, 2005)

A utilização do TI está na génese do aumento do grau de sofisticação dos sistemas urbanos, principalmente, quando atingem uma dimensão metropolitana com uma repartição modal baseada nessa utilização, debilitando, assim, a competitividade do sistema de transportes públicos, podendo por em causa a acessibilidade a funções primárias e de suporte às atividades económicas das cidades e diminuindo níveis de eficiência (Afonso, 2015).

O uso do automóvel na Europa cresceu cerca de 5,7% para o período de 2012 a 2016. Por outras palavras, o número de automóveis a circular passou de 243 para 257 milhões, onde 95.9% utilizam combustíveis fósseis (ACEA, 2018). No que diz respeito à repartição modal do transporte de passageiros, 81,3% da população da Europa utilizava o transporte individual (Comissão Europeia, 2018). No caso de Portugal, o uso do automóvel cresceu 2,2% (2012-2016), passando de 4,5 para 4,6 milhões. Relativamente, ao tipo de combustível cerca de

99,2% dos veículos em circulação utilizavam combustíveis fósseis (ACEA, 2018). O transporte individual representa 89,1 % da repartição modal¹.

De acordo com os resultados do Inquérito à Mobilidade nas Áreas Metropolitanas do Porto (AMP) e Lisboa (AML), realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), em 2017, o automóvel foi o principal meio de transporte nas deslocações realizadas pelos residentes nas áreas metropolitanas (67,6% na AMP e 58,9% na AML), considerando os dias da semana em geral (INE, 2018).

É esperado que as áreas urbanas e suas populações cresçam substancialmente nos próximos anos. A escala dos problemas a serem enfrentados relacionados com o congestionamento, a poluição, o consumo de recursos naturais, a segurança, a acessibilidade e, em particular, os efeitos e consequências das alterações climáticas, provavelmente crescerá mais rapidamente do que as populações urbanas, como resultado da crescente motorização e expansão urbana (May, 2013).

2. Principais impactes do Setor dos Transportes

Os sistemas de transporte estão ligados a uma ampla gama de considerações ambientais em todas as escalas geográficas. A natureza destes impactes ambientais está relacionada com os modos de transporte em si, os seus sistemas de fornecimento de energia, as emissões atmosféricas e as infraestruturas em que operam. Embora consumam grandes quantidades de energia, especialmente petróleo e seus derivados, os veículos também emitem numerosos poluentes, como dióxido de carbono, óxido de azoto e emitem ruído. Adicionalmente, as infraestruturas de suporte ao Setor dos Transporte têm danificado diversos sistemas ecológicos de forma irreversível (Rodrigue *et al*, 2017).

Além dos impactes ambientais, existem diversos problemas associados ao setor dos transportes, nomeadamente, congestionamentos, problemas de saúde derivados da poluição atmosférica, acidentes e outros. Estes impactes assumem um carácter socioeconómico, sendo considerados como externalidades.

¹ <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

2.1 Consumo Energético

Todos os transportes motorizados, seja para transporte passageiros ou mercadorias, requer uma quantidade de energia considerável (Moriarty e Honnery, 2016).

Atualmente, na UE, o Setor do Transporte constitui uns dos setores mais intensivos relativamente ao consumo de energia final, representando cerca de 33% do consumo (Figura 2). Ao longo dos anos tem-se verificado uma tendência de redução dos consumos dos setores da indústria e doméstico, muito devido à evolução tecnológica que proporcionou o aumento da eficiência energética dos equipamentos e processos. Contrariamente, o setor dos transportes não seguiu esta tendência, apresentando um aumento, de certa forma contínuo, verificando-se, no entanto, algumas descidas e subidas nos últimos anos.

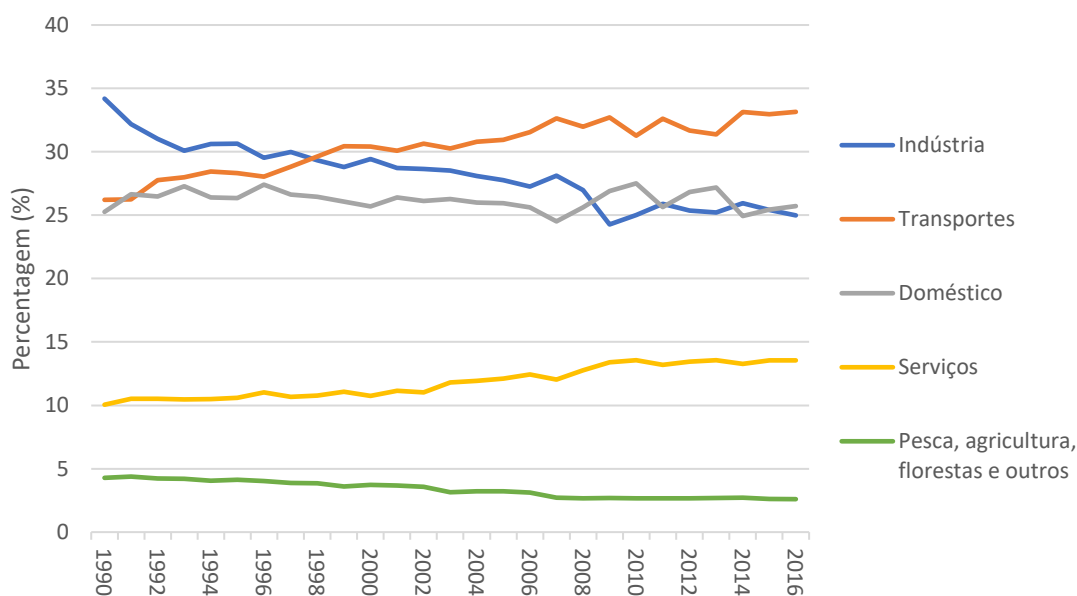


Figura 2 - Consumo de energia final por setor na UE (adaptado de: EEA, 2018b)

O consumo anual de energia dos transportes aumentou 38% entre 1990 e 2007. No entanto, a recessão económica provocou um declínio subsequente na procura, levando a uma diminuição de 3% na procura energética entre 2007 e 2016. Contudo, entre 1990 e 2016 verificou-se um aumento líquido de 34% no consumo de energia no Setor dos Transportes, grande parte deste crescimento deve-se, essencialmente, ao transporte rodoviário (Figura 3) (EEA, 2018a).

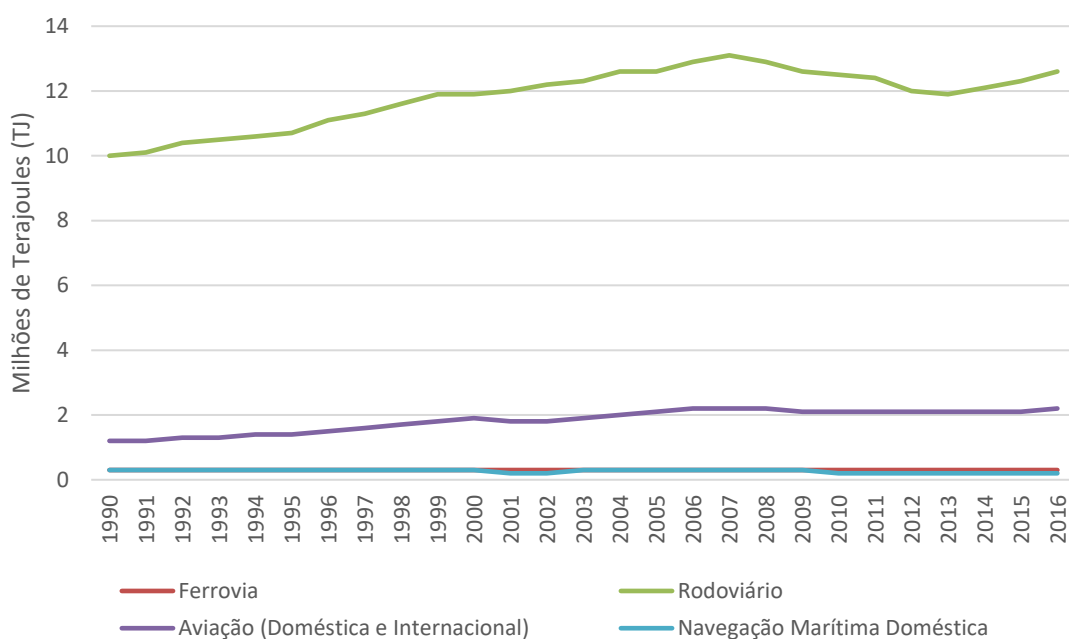


Figura 3 - Consumo de energia final por modo de transporte na UE (Adaptado de: EEA, 2018a)

No caso de Portugal, a variação ocorrida ao longo dos anos foi, de certa forma, semelhante à da UE. Porém, a indústria apresenta-se com relativo destaque no consumo de energia final em relação aos restantes setores, apresentando, no entanto, uma redução gradual ao longo do tempo. Os Setores dos Serviços e Transporte têm-se tornado cada vez mais intensivos energeticamente. Atualmente, os setores que consomem a maior parcela de energia final são os Setores da Indústria e Transportes com cerca de 45% e 28%, respetivamente (Figuras 4 e 5).

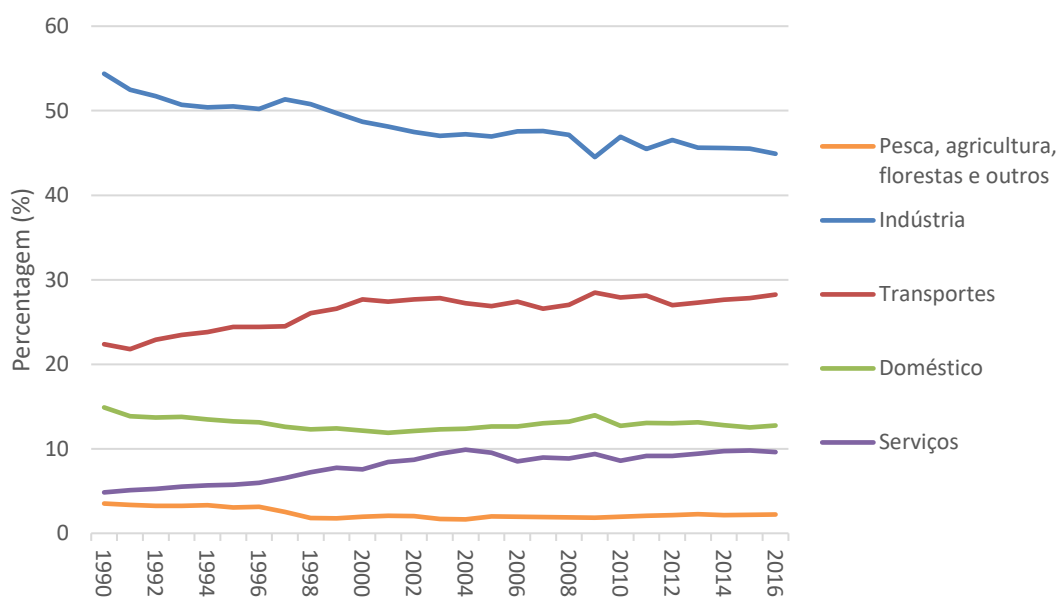


Figura 4 - Consumo de energia final por setor em Portugal (adaptado de: OE, 2018)

Relativamente ao consumo anual de energia no Setor dos Transportes, este aumentou cerca de 49% para o período de 1990 a 2008. Contudo, entre 2010 e 2013, verificou-se uma diminuição na ordem dos 18%. Esta diminuição está relacionada com os impactos que a crise económica originou nos diversos setores da economia, nomeadamente, no Setor dos Transportes, que resultou em anos de recessão, diminuição do investimento e queda das atividades económicas. A partir de 2013 tem-se verificando uma tendência crescente no consumo por parte deste setor.

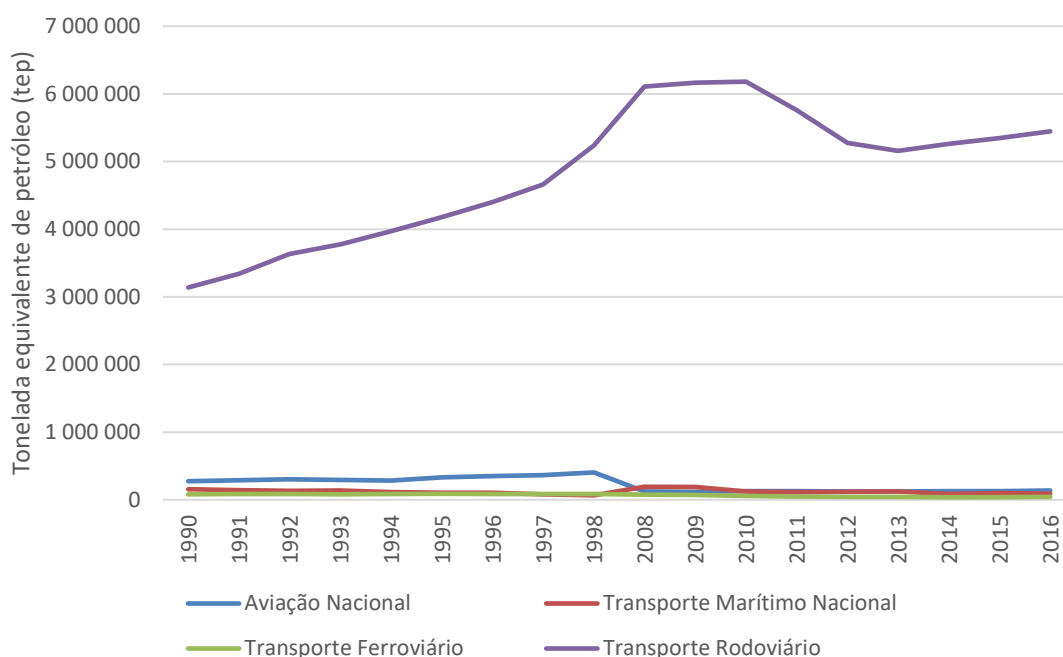


Figura 5 - Consumo de energia final por modo de transporte em Portugal (Adaptado de: OE, 2018)

Desde 2010, que a intensidade energética, nos transportes em Portugal, tem sido inferior à média da UE, contudo, nos últimos 3 anos, inverteu-se, situando-se, atualmente, acima da média europeia (APA, 2018b).

2.2 Emissões de Gases com Efeito de Estufa

Segundo o 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC - sigla em inglês), as atividades humanas, nas últimas décadas, são a principal causa para o aquecimento acelerado do planeta. Estas atividades incluem a utilização intensiva de combustíveis fósseis, a desflorestação e a agricultura (IPCC, 2014).

Sendo o Sector dos Transportes, um grande consumidor de energia, é também responsável por uma grande parte da emissão de GEE, exercendo fortes pressões sobre o meio ambiente e bem-estar humano.

Na Figura 6, estão representadas as emissões de GEE dos 28 países da EU, em 2016, agrupadas por setor. O Sector Energético foi responsável por mais de 70% das emissões de GEE, das quais o transporte (incluindo a aviação e o transporte marítimo) representa mais de 20%.

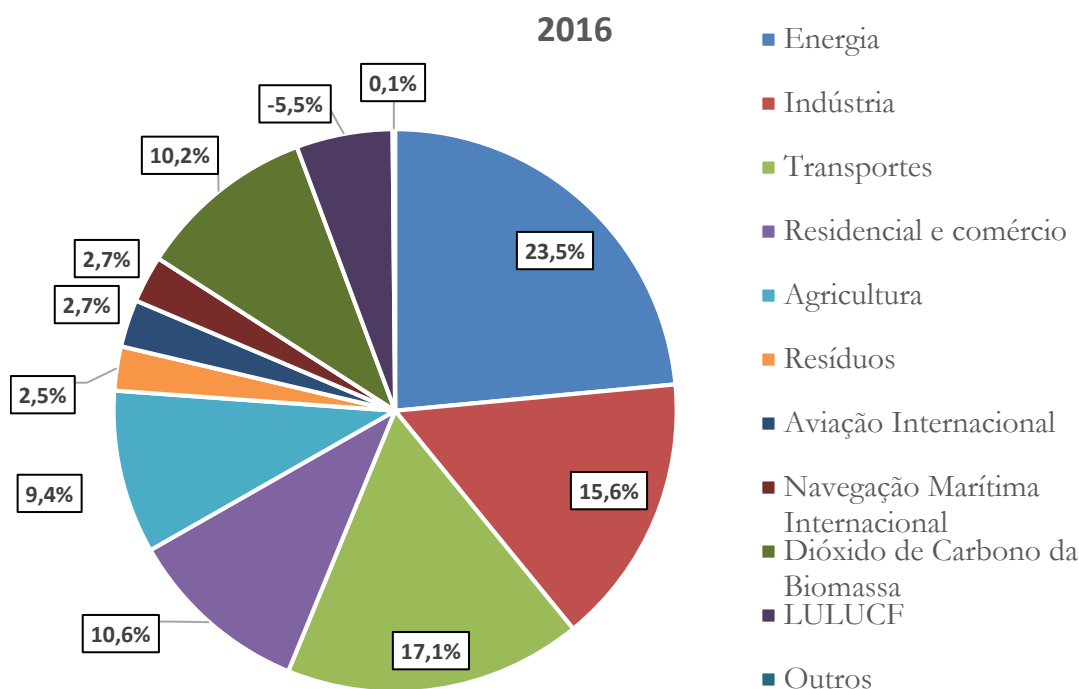


Figura 6 - Emissões de GEE na UE por setor (2016) (adaptado de: EEA, 2018c)

Desde 2014, as emissões de GEE do Setor dos Transportes da Europa têm vindo a aumentar. Em comparação com 2015, as emissões em 2016 aumentaram quase 3%, principalmente devido ao aumento das emissões do transporte rodoviário. Em 2016, o transporte rodoviário foi responsável por quase 72% do total das emissões provenientes dos transportes (incluindo a aviação internacional e o transporte marítimo internacional). Destas emissões, 44% foram derivadas do TI de passageiros (EEA, 2018d). No entanto, comparando com os níveis de 1990, as emissões provenientes dos transportes situam-se mais de 26% acima, em 2016.

De acordo com o Inventário Nacional de Emissões (INERPA) de 2018 (relativamente ao ano de 2016), as emissões de GEE, são estimadas em cerca de 67,8 Mt CO₂eq, representando um aumento de 13,1% face a 1990 (APA, 2018a).

Em 2016, o Setor da Energia, estando aqui incluído os transportes, mantém-se como o um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE (cerca de 70% das emissões nacionais) (Figura 7). Neste setor, a produção de energia e os transportes são as fontes com maior importância representando cerca de 26% e 25% do total de emissões nacionais (APA, 2018a).

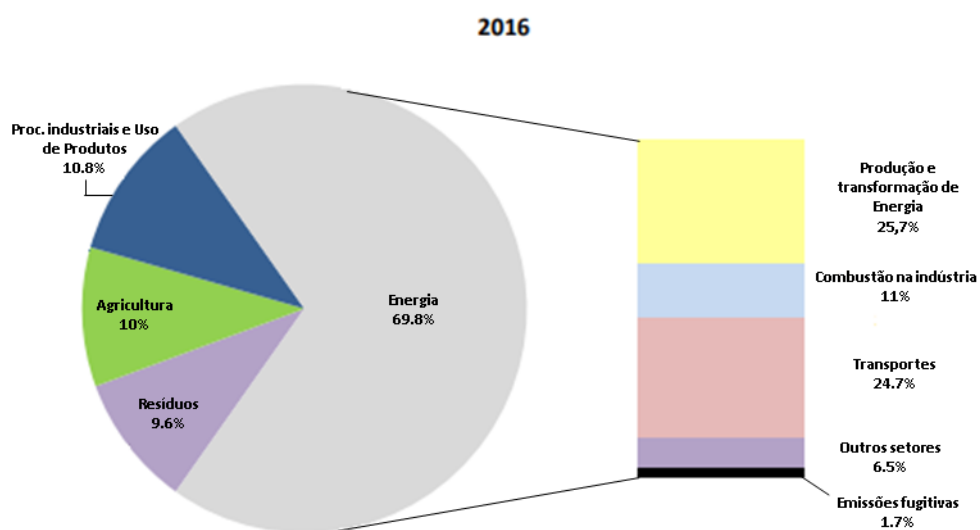


Figura 7 - Emissões de GEE em Portugal por setor (2016) (Adaptado de: APA, 2018a)

No período entre 1990-2016, as suas emissões de GEE, no Setor dos Transportes, aumentaram 63%. Após um período de aumento das emissões até aos anos 2000, seguido de um período de estabilização, assinalou-se em 2005 um decréscimo das emissões deste setor. Nos anos mais recentes, a tendência de redução inverteu-se, verificando-se, atualmente, um aumento das emissões dos transportes, em cerca de 5,1%, entre 2013 e 2016 (Figura 8) (APA, 2018a).

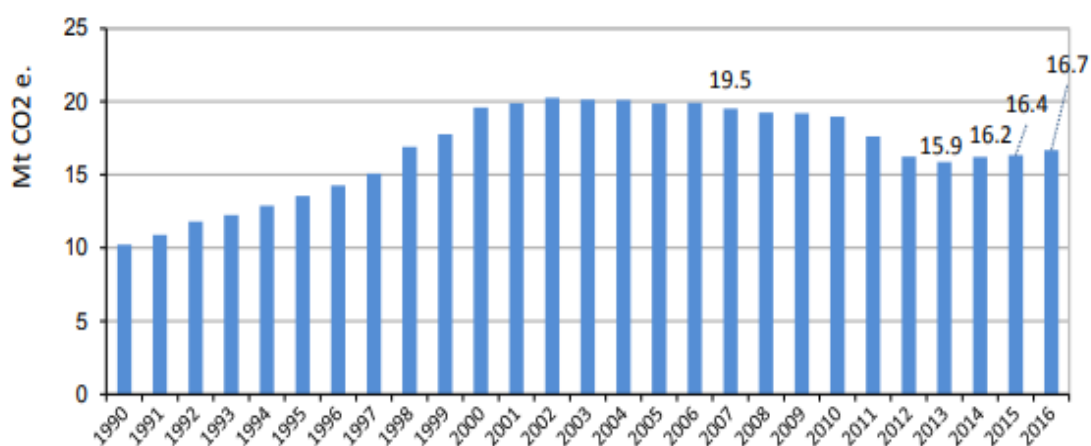


Figura 8 - Evolução das Emissões de GEE no setor dos transportes em Portugal (1990-2016) (Fonte: APA, 2018a)

2.3 Poluição Sonora

A poluição sonora continua a ser um dos problemas de saúde ambiental mais significativos na Europa, sendo o Sector dos Transportes uma das principais causas. O ruído proveniente do tráfego rodoviário é a fonte dominante da exposição humana acima do limite da UE de 55 decibéis (dB) para a exposição diária e 50 dB para a exposição noturna. Cerca de 100 milhões de pessoas estão expostas ao ruído do tráfego rodoviário acima de 55 dB na Europa (Figura 9). Destes, 32 milhões estão expostos a níveis muito elevados de ruído (acima de 65 dB). A ferrovia é a segunda maior fonte, com 19 milhões de pessoas expostas acima de 55 dB. O ruído dos aviões, próximo aos principais aeroportos, é a terceira fonte principal, com mais de 4,1 milhões de pessoas expostas, seguido de ruído industrial dentro das áreas urbanas, com 1,0 milhão de pessoas expostas (EEA, 2017).

Segundo a *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde), o ruído do tráfego rodoviário é o segundo pior “agressor” ambiental na Europa, atrás da poluição do ar. Os efeitos nocivos do ruído surgem principalmente da reação de stress que provoca no corpo humano, que também pode ocorrer durante o sono. Estes podem levar, potencialmente, à morte prematura, doenças cardiovasculares, comprometimento cognitivo, distúrbios do sono, hipertensão e aborrecimento (WHO, s.d.; EEA, 2017).

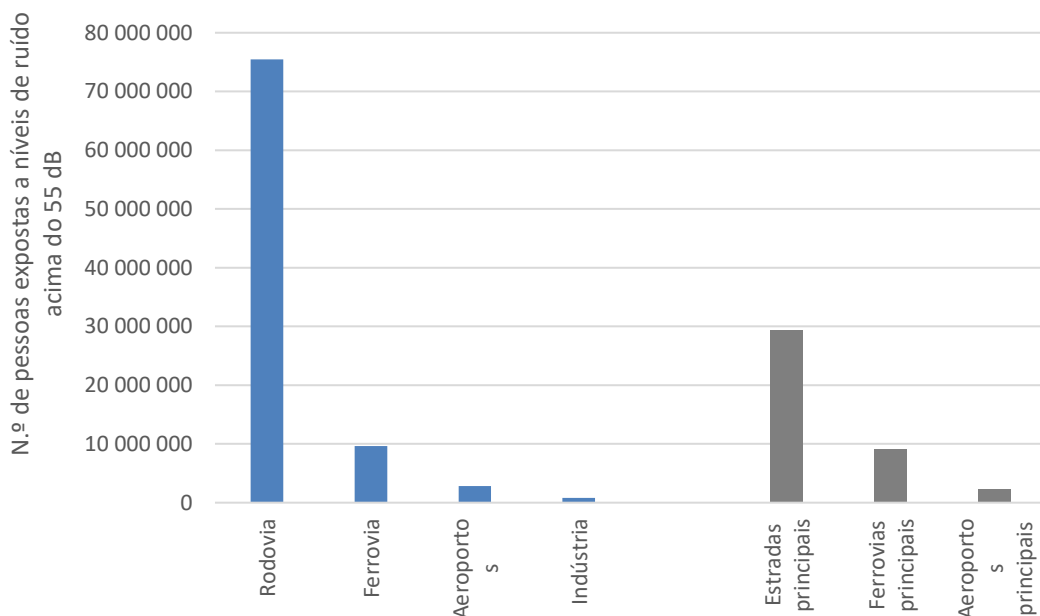


Figura 9 - N.º de pessoas expostas a níveis de ruído acima de 55 dB na Europa (Adaptado de: EEA, 2017)

A redução dos volumes de tráfego reduz as exposições ao ruído, bem como os poluentes

emitidos pelos veículos. Segundo dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2017), em Portugal, cerca de 15% da população está exposta a níveis sonoros associados a incomodidade moderada ($L_{den} > 55\text{dB}$). No que diz respeito à poluição sonora proveniente dos meios de transporte, o meio rodoviário constitui, pela sua dispersão geográfica, a principal fonte sonora, seguido do ferroviário e terminando no aéreo.

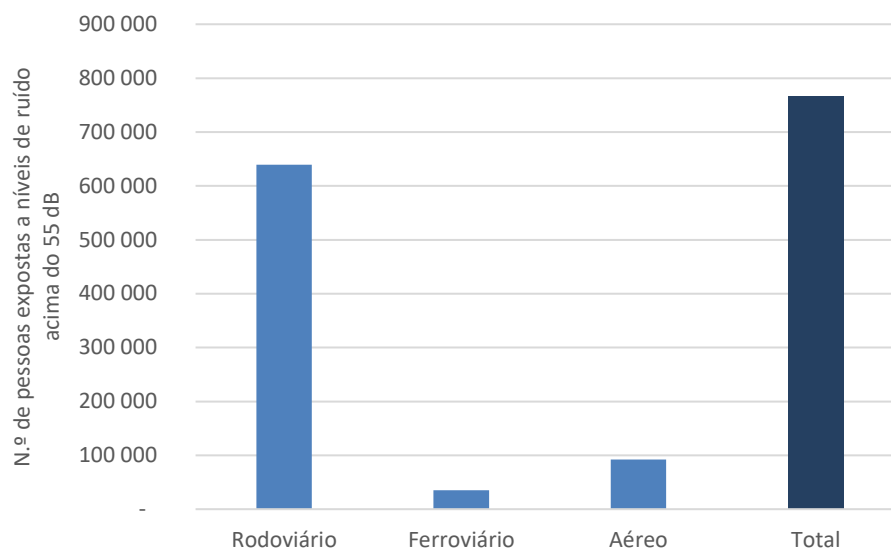


Figura 10 - N.º de pessoas expostas a níveis de ruído acima de 55 dB em Portugal (Adaptado de: APA, 2017)

2.4 Congestionamentos, ocupação de espaço e acidentes

O congestionamento é um dos problemas de transporte mais prevalentes nas grandes aglomerações urbanas, geralmente acima de um limiar de cerca de 1 milhão de habitantes. O congestionamento está particularmente ligado à motorização e à difusão do automóvel, o que aumentou a procura por infraestruturas de transporte. No entanto, o fornecimento de infraestruturas muitas vezes não consegue acompanhar o crescimento da mobilidade. Como os veículos passam a maior parte do tempo estacionados, a procura por vagas de estacionamento criou problemas de consumo de espaço, principalmente, nas áreas urbanas (Rodrigue *et al*, 2017).

O congestionamento e o estacionamento estão inter-relacionados, uma vez que o estacionamento requer a ocupação de solo. Além disso, procurar um espaço de estacionamento cria atrasos adicionais e prejudica a circulação local. Nas áreas centrais das grandes cidades, os condutores podem passar até 20 minutos à procura de espaço para estacionamento. Esta prática é muitas vezes considerada economicamente mais eficiente do

que usar um estacionamento pago, já que o tempo gasto procurando por um espaço de estacionamento gratuito (ou de baixo custo) é compensado pela poupança monetária (Rodrigue *et al*, 2017).

Segundo Torres (2007, citado em Silva, 2015), o desequilíbrio da circulação urbana é provocado pelos congestionamentos, criando um círculo vicioso, em que os principais afetados são os utilizados dos transportes públicos. Por isso, identificar a verdadeira causa do congestionamento é uma questão estratégica para o planeamento urbano, já que o congestionamento é comumente o resultado de circunstâncias específicas, como a falta de estacionamento ou sinais de tráfego mal sincronizados (Rodrigue *et al*, 2017).

O uso do automóvel está diretamente ligado aos acidentes rodoviários. Em 2016, 25 624 pessoas morreram em acidentes rodoviários na UE (Eurostat, 2017). Apesar da tendência de redução dos acidentes rodoviários que se tem vindo a verificar nos últimos 20 anos, este continua ainda a ser um dos grandes problemas dos transportes.

O transporte é fundamental para a vida dos cidadãos em todo o mundo, mas os atuais padrões de utilização do transporte, ditados principalmente pelos veículos movidos a combustíveis fósseis, geram uma série de custos ambientais, sociais e económicos.

3. Mobilidade Sustentável

Embora não haja uma definição comum de transporte sustentável, é geralmente aceite que o transporte sustentável implica o equilíbrio económico, social e ambiental (Steg e Gifford, 2005). Uma das definições deste conceito pode ser encontrada no *The Brundtland Report* (WCED, 1987) que o define como: “*satisfazer as necessidades atuais de transporte e mobilidade sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer essas mesmas necessidades*”. Rodrigue *et al* (2017) define o transporte sustentável como aquele que tem a “*capacidade de suportar as necessidades de mobilidade de uma sociedade de uma maneira que seja menos prejudicial para o ambiente e não prejudique as necessidades de mobilidade das gerações futuras*”.

Segundo Black (2000), os atuais sistemas de transporte, em especial, o sistema rodoviário de veículos motorizados, não são sustentáveis e surge a questão de saber exatamente o que é que impede que esses sistemas atendam às necessidades futuras de transporte e mobilidade. Ainda Black (2000, citado em Black, 2002) refere que entre as barreiras à sustentabilidade dos transportes estão:

1. Problemas ambientais;
2. O uso de recursos não renováveis pelos meios de transporte atuais;
3. Grande número de mortes e feridos;
4. Problemas locais de poluição do ar;
5. Problemas de congestionamento.

Em coerência com a definição de desenvolvimento sustentável², a especificação para um sistema de transporte sustentável requer que o movimento de pessoas e bens seja efetuado de maneira ambiental, social e economicamente viável, ou seja, a mobilidade, independentemente da finalidade, deve ser considerada como um meio e não como um fim. Com isto, a mobilidade ambientalmente sustentável implica mudanças de comportamento e novas abordagens inovadoras em todos os níveis da sociedade e setores da economia, tendo sempre em atenção os limites ecológicos e a prevenção da poluição (Caid *et al*, 2002).

De acordo com Caid *et al* (2002), um sistema de transportes sustentável é aquele que:

- Proporciona segurança, é economicamente viável e socialmente aceitável pela sociedade;
- Vai ao encontro dos objetivos de saúde e qualidade ambiental;
- Protege os ecossistemas, ou não excede as cargas críticas, e os níveis de integridade do ecossistema em que está inserido;
- Não agrava os fenômenos adversos, como as alterações climáticas, a degradação da camada do ozono e a disseminação de poluentes orgânicos persistentes.

De acordo com Bannister (2008), para concretizar esta ideologia de um sistema de transporte sustentável, é necessário:

- i) **reduzir a necessidade de viagens** ou até mesmo a sua substituição através do surgimento de novas tecnologias de informação e comunicação (TIC) e do trabalho em casa. Isso significa que a realização de viagens não é necessária traduzindo em efeitos positivos para a sustentabilidade;
- ii) **medidas políticas de ordenamento do território**, mais especificamente, na redução das distâncias. Essas medidas têm como objetivo principal integrar a mobilidade sustentável nos padrões das formas urbanas;

² Segundo o *The Brundland Report*, o desenvolvimento sustentável é aquele que “*satisfaz as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades*”.

iii) medidas políticas deste tipo só são possíveis quando se **(re)desenvolve os aglomerados**, podendo ter um impacto bastante positivo na mobilidade; Medidas políticas focada nos transportes incentivando a transferência modal. Estas medidas podem tornar o sistema de mobilidade mais sustentável, reduzindo os níveis de utilização do transporte individual, promovendo a transferência modal para meios menos poluentes como os meios suaves (a pé ou bicicletas) e transporte público não rodoviário (comboio ou metro);

iv) por fim, a **inovação tecnológica** orientada para o aumento da eficiência. A eficiência tecnológica e a mudança de comportamento tornam o sistema de mobilidade mais limpo e eficiente. Portanto, é importante usar a melhor tecnologia disponível e estimular essas tecnologias. Pode-se pensar, por exemplo, em carros elétricos e nos sistemas de metro movidos a eletricidade.

Logo, o planeamento de um sistema de transportes sustentável deve estar em sintonia e, acima de tudo, em equilíbrio com os aspetos ambientais, económicos e sociais, quer atualmente como futuramente (Steg e Gifford, 2005).

O objetivo primordial de uma estratégia de transportes sustentável, em termos de mobilidade, deve permitir que os *outputs* originados pelos transportes sejam mantidos, ou até mesmo aumentados, reduzindo ao mesmo tempo o consumo de energia, particularmente, da energia proveniente de fontes não renováveis. Isso significaria uma redução nas emissões, melhorias na qualidade do ar e a promoção do uso de combustíveis alternativos, nomeadamente, de fontes renováveis (Banister *et al*, 2007). Para tal, uma combinação acertada de medidas políticas e inovações tecnológicas é imperativo, uma vez que os transportes são extremamente dependentes dos avanços tecnológicos para reduzir o consumo de energia e emissões de GEE (Banister *et al*, 2000; Banister *et al*, 2007; Lah *et al*, 2019).

Banister (2007) defende que um sistema de transportes sustentável só poderá ser alcançado com uma forte combinação de quatro conjuntos separados de medidas políticas:

- i) **tecnologia e preços**, incluindo investimento em tecnologia nos modos de transporte, nos sistemas de informação e no próprio sistema de transporte;
- ii) **regulação**, incluindo licenciamento de condutores e veículos, tributação e preços, normas e regulamentos de trânsito;

- iii) **desenvolvimento do ordenamento do território**, incluindo planeamento e regulação;
- iv) **informação**, incluindo “pressão” social, consciencialização, persuasão e marketing.

Loo e Tsoi (2018) apresentam uma estratégia holística denominada de “As Cincos Transformações”. Esta estratégia oferece uma teoria abrangente e sinérgica para enfrentar os vários problemas inerentes ao setor dos transportes, promovendo o transporte sustentável.

As “cincos transformações” referidas nesta teoria debruçam-se:

- na **transformação das cidades**, através de um melhor planeamento espacial, melhorando as acessibilidades nas cidades;
- na **transformação da economia** com o objetivo de reduzir as externalidades negativas originadas pelo Setor dos Transportes associado aos bens e serviços;
- na **transformação dos veículos** através do desenvolvimento de novas tecnologias de baixo consumo, a utilização de combustíveis alternativos e aumento da eficiência energética;
- na **transformação da repartição modal**, aumentando o uso do transporte público e suprimindo a utilização do transporte individual;
- e por fim, na **transformação do estilo de vida**, sendo este encarado como o aspeto mais desafiador, uma vez que, o comportamento está sujeito à variabilidade individual de crenças, hábitos e preferências pessoais. Aliado a isto, a formulação de um conjunto de instrumentos políticos em diferentes escalas espaciais é fundamental para dissociar as externalidades negativas do transporte.

Para os autores, o ordenamento do território pode ser um impulsionador importante e um mecanismo para reforçar as políticas dos transportes, potenciando assim a mudança de comportamentos para meios de transportes mais sustentáveis. Os cidadãos são uma parte essencial de qualquer política, uma vez que os efeitos, sejam positivos ou negativos, irão recair sobre eles (Ibeas, dell’Olio e Montequín, 2011). Contudo, abordar a complexidade do comportamento dos passageiros é um desafio deveras complicado, sendo, por outro lado, essencial a adoção de medidas e abordagens orientadas para as pessoas, juntamente com o planeamento do ordenamento do território e do transporte sustentável.

Para Mozos-Blanco *et al* (2018), os planos de mobilidade urbana sustentável devem possuir estratégias que tenham em consideração, não só a mobilidade, mas também a qualidade de

vida dos cidadãos, os impactos a curto e longo prazo, os grupos afetados e a cultura social em que cada medida é aplicada. Adicionalmente, referem também, que as medidas não devem focar-se somente no transporte público, mas também no planeamento da forma e *layout* das cidades.

Segundo May (2013), a contribuição mais importante para o desenvolvimento de um sistema de transportes sustentáveis continua e, provavelmente, continuará a ser feita por cidades que estejam dispostas a inovar, seja através de instrumentos e pacotes de políticos, *governance*, finanças ou através do processo político.

Para Koras *et al* (2017), “*a transição para cidades mais sustentáveis não pode desconsiderar a complexidade das questões envolvidas no metabolismo urbano*”. Para os autores a questão não se centra apenas na busca por novas fontes de energia e materiais. Os aspetos sociais, ambientais, económicos e biofísicos são desafios impostos pelas cidades que interagem entre si, sendo determinantes para o desenvolvimento, riqueza e bem-estar. Para que o futuro das cidades seja assegurado, a consciencialização e as soluções para os diversos problemas, devem estar bem consolidadas e na direção acertada. Por último, mas não menos importante, embora seja verdade que “... *os sistemas urbanos representam uma enorme convergência de recursos e padrões de consumo ...*”, também é verdade e nunca deve ser desconsiderado que “... *as cidades também representam o motor da inovação e da informação e as possíveis soluções*”.

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos, o desenvolvimento económico e as questões ambientais rapidamente deram origem às “*Smart Cities*” (Cidades Inteligentes) - um coletivo de parcerias municipais e privadas que alavancam as TIC para usar recursos de forma mais inteligente e eficiente com os objetivos de alcançar a poupança energética e diminuição dos preços sobre os contribuintes/população, melhorando a prestação de serviços e a qualidade de vida, e reduzindo assim, os impactos ambientais adversos – com base na inovação, a eficiência do governo e a sustentabilidade ambiental.

Uma das principais áreas em que a “*smartness*” (inteligência) é crucial para as cidades é o Setor de Transportes. Essa importância colocou a mobilidade inteligente no centro dos discursos e práticas das “*smart cities*”, onde é amplamente vista como conectividade em cidades é acessível, eficaz, atraente e sustentável (Garau *et al*, 2016). Todavia, conforme argumenta Lyons (2016), na prática da mobilidade, os paradigmas do “*smart*” e do sustentável não estão fortemente alinhados; os paradigmas devem, portanto, ser reunidos no sentido de um quadro

comum para um desenvolvimento verdadeiramente inteligente e sustentável da mobilidade urbana.

A mobilidade inteligente é ainda um conceito relativamente recente, que tem atraído a atenção de diversos especialistas, investigadores, e até mesmo dos governos, na última década (Jeekel, 2017). Segundo Lyons (2016), a mobilidade urbana inteligente é aquela que usa a tecnologia para criar e partilhar dados, informação e conhecimento para ajudar na tomada de decisão; usa tecnologia para melhorar os veículos, infraestruturas e serviços; e obter melhorias para operadores e utilizadores dos sistemas de transporte e para as partes interessadas.

Segundo Jeekel (2017), há uma diferença conceptual entre a mobilidade sustentável e a mobilidade inteligente. A mobilidade sustentável apresenta uma visão de longo prazo com objetivos desafiados centrados nos 3 pilares base do desenvolvimento sustentável, estando focada na gestão da transição, investigação e desenvolvimento. A mobilidade inteligente assume medidas e estratégias com um carácter mais a curto prazo com objetivos mais tangíveis e rápidos.

4. A eficiência energética e a sustentabilidade dos transportes

A eficiência energética dos transportes tem estado na vanguarda da noção alargada de eficiência energética, em parte porque, historicamente, diferentes modos com características muito diferentes competiram para fornecer serviços de passageiros e mercadorias (Moriarty e Honnery, 2012).

Por forma a tornar os sistemas de transportes sustentável e energeticamente eficiente é necessário atuar em três diferentes níveis/componentes de eficiência (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012):

- Eficiência do veículo;
- Eficiência das viagens;
- Eficiência do sistema.

Em consonância com estes três níveis/componentes de eficiência existe três básicas estratégias com a finalidade de aumentar e estimular a eficiência energética a esses níveis. Tais medidas são:

- Evitar/diminuir o aumento da atividade do transporte e redução a procura pelo transporte;
- Mudar a procura para meios de transporte mais eficientes;
- Melhorar os veículos e o combustível utilizado.

Dalkmann e Brannigan (2007) desenvolveram, através dos princípios referidos, uma abordagem denominada por “*Avoid-Shift-Improve*” (ASI) (Evitar-Mudar-Melhorar) (Figura 11). Esta abordagem fornece um panorama holístico de estratégias de ação para encorajar e estimular a criação de um sistema de transporte sustentável. A abordagem ASI tem foco na questão de como reduzir as emissões de GEE e aumentar a eficiência energética, começando num nível micro (sistema, veículo e viagens) em que o resultado final se traduzirá na eficiência energética global do sistema de transporte urbano (Dalkmann e Brannigan, 2007; Bongardt *et al*, 2013). Por outras palavras, abordagem ASI descreve as três formas básicas de alcançar a mobilidade de baixo carbono, reduzindo/evitando a procura, mudando para, ou mantendo, a participação de modos de baixo carbono, como caminhar e transportes públicos, nomeadamente, o ferroviário, bem como melhorar a eficiência dos motores e a qualidade dos combustíveis.

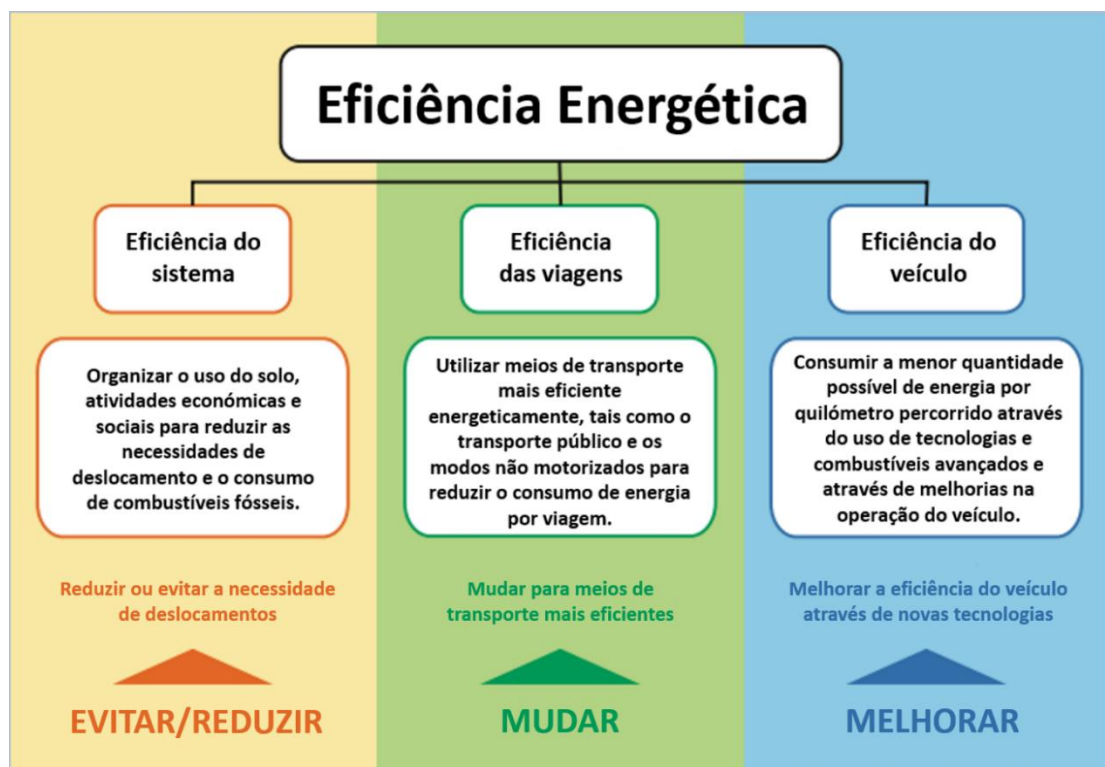


Figura 11 - Sistema de transporte urbano eficiente (Adaptado de: Böhler-Baedeker e Hüging, 2012)

A eficiência energética do sistema de transporte urbano irá resultar da multiplicação de cada um dos desempenhos nos três níveis identificados, traduzindo-se na seguinte equação (1):

$$E_{Transporte\ urbano} = E_{sistema} * E_{viagens} * E_{veículo} \quad (1)$$

4.1 A estratégia “*Avoid/Reduce*” (Evitar/Reduzir) – Eficiência do sistema

A eficiência do sistema está diretamente relacionada em como a procura pelo transporte, e por outros modos de transportes, é criada e, posteriormente, mitigada ou reduzida (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012, Bongardt *et al*, 2013). Como referido anteriormente, a infraestrutura e a estruturas das cidades desempenham um papel importante na criação desta procura. Segundo Newman e Kenworthy (1989, citado em Bongardt *et al*, 2013), o consumo de energia *per capita* é inversamente proporcional à densidade da cidade.

A redução do volume de tráfego é um aspeto crucial para um transporte energeticamente eficiente e de baixo carbono (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012, Bongardt *et al*, 2013).

Para Böhler-Baedeker e Hüging (2012), o ordenamento do território deve, portanto, otimizar o posicionamento das estruturas de habitação e produção para evitar o tráfego ou reduzir as distâncias viajadas. Uma estrutura urbana densa com usos mistos é essencial para a alta eficiência do sistema, pois envolve distâncias de viagem mais curtas e uma transferência modal do transporte rodoviário (que consome uma enorme quantidade de espaço) para modos de transporte mais eficientes, como caminhadas, ciclismo e transporte público. Os pré-requisitos para a eficiência do sistema não incluem apenas um sistema de cidade denso, mas também uma gestão apropriada da procura de transporte e de uma rede de transporte público adequada.

4.2 A estratégia “*Shift*” (Mudar) – Eficiência das viagens

A eficiência das viagens está diretamente relacionada com o consumo de energia dos diferentes modos de transporte. Os parâmetros principais da eficiência das viagens são a preponderância relativa dos diferentes modos de transporte (repartição modal/transferência, modal) e a taxa de ocupação dos veículos. O consumo específico de energia, por passageiro*km ou por tonelada*km, varia entre os diferentes modos de transporte. Uma forma eficaz de melhorar a eficiência das viagens é estimular os passageiros ou os

transportadores de mercadorias a utilizarem meios de transporte mais eficientes, como o TP e veículos não motorizados (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012).

Em geral, o transporte individual motorizado é muito menos eficiente, em termos energéticos, do que o transporte público. Outra alternativa importante é os modos de transporte não motorizado que não necessitam de combustível. O consumo de energia *per capita* depende em grande parte da taxa de ocupação dos veículos autorizados (Bongardt *et al*, 2013).

Por forma, a criar um sistema de transporte eficiente, as viagens efetuadas através do transporte individual precisam de ser reduzidas, enquanto que a repartição dos transportes não motorizados e públicos deve ser aumentada, especialmente nas áreas urbanas, uma vez que a maioria dos percursos efetuados envolve distâncias inferiores a cinco quilómetros. Uma variedade de medidas pode ser implementada para estimular os cidadãos a viajar tais distâncias de bicicleta ou a pé, evitando, desta forma, o consumo desnecessário de energia (combustível). Para viagens mais longas, o TP é uma alternativa viável ao uso do TI. Aumentar a taxa de utilização do transporte público levará a taxas de ocupação superiores em autocarros, comboios e metros, o que aumentará ainda mais a eficiência energética (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012). Segundo os mesmos autores, além do transporte de passageiros, a eficiência energética necessita de ser aumentada no transporte de mercadorias. O transporte ferroviário de mercadoria é, particularmente, eficiente energeticamente devido à sua alta taxa de ocupação, no entanto, a sua flexibilidade é limitada. Uma rede logística sofisticada, incluindo centros logísticos multimodais (ferroviário/rodoviário ou portuário/rodoviário), pode contribuir para a mudança do transporte de mercadorias para modos de transporte mais eficientes.

4.3 A estratégia “*Improve*” (Melhorar) – Eficiência do veículo

Reduzir o consumo de energia por quilómetro dos veículos aumenta a sua eficiência (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012). Isto pode ser alcançado através do desenvolvimento tecnológico e melhorias no *design*, mas também através de estilos de condução mais eficientes e menos equipamentos de alto consumo incorporado nos veículos (por exemplo, ar condicionado) (Bongardt *et al*, 2013).

As estratégias de melhoria (“*Improve*”) não são apenas relevantes para os automóveis particulares, mas também para o transporte público e de mercadorias. Medidas específicas para os automóveis incluem o uso de materiais leves, *downsizing* (redução do volume do motor e tamanho do carro) e/ou usando motores híbridos. Uma combinação de tais medidas reduz significativamente o consumo de energia em comparação com um automóvel convencional (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012).

Tais melhorias tecnológicas são, principalmente, um trabalho para fabricantes de veículos e centros de investigação e desenvolvimento. No entanto, a legislação e as medidas fiscais podem ser importantes impulsionadores dos avanços tecnológicos. As autoridades locais e nacionais podem apoiar a difusão de tecnologias eficientes no mercado, definindo padrões normativos, aumentando a consciencialização e criando incentivos para que os consumidores comprem veículos mais eficientes em termos de energia (Böhler-Baedeker e Hüging, 2012).

4.4 Externalidade positivas

A abordagem ASI oferece múltiplas externalidade positivas (ou co-benefícios) e, ainda, promove a redução de custos relacionados com a segurança rodoviária, poluição do ar, alterações climáticas, atenuação e/ou remoção dos subsídios sobre os combustíveis, acessibilidade universal e transporte de mercadorias “verde”, servindo múltiplos grupos da sociedade e negócios.

Na maioria dos casos, aqueles que beneficiam das medidas de eficiência energética não são os que os investidores ou os que financiam. No Sector dos Transportes, os municípios têm frequentemente que suportar os custos adicionais para fornecer sistemas de transporte eficientes em termos energéticos, apesar de serem as empresas e a população que delas beneficiam. No entanto, alguns investimentos têm um carácter a longo prazo.

Melhorias na eficiência energética podem ter múltiplos benefícios e, assim, proporcionar um incentivo adicional para que os governos locais e nacionais implementem as medidas necessárias que são dispendiosas. Dependendo das circunstâncias locais, as externalidades positivas provenientes das políticas de eficiência energética podem até ser a razão original para aprová-los e justificar o investimento. De acordo com Böhler-Baedeker e Hüging (2012), os co-benefícios mais comuns podem ser agrupados em quatro categorias (Figura 12):

- **Desenvolvimento económico mais forte:** Como regra, a dependência de petróleo e do TI motorizado não promove empregos locais ou o desenvolvimento económico sustentável das cidades. Por outro lado, um aumento na repartição modal do transporte público e de meios de transporte não motorizados pode trazer vantagens económicas para as cidades. Por exemplo, uma redução no congestionamento leva a uma poupança de tempo. A utilização mais eficiente dos recursos energéticos também é acompanhada de maior eficiência no uso de outros recursos escassos e valiosos. Cidades com um sistema de transporte urbano inteligente e baixos níveis de congestionamento frequentemente atraem mais investimentos do que outras cidades, porque grandes empresas reconhecem que seus funcionários são mais saudáveis, que podem viajar com mais facilidade, chegar pontualmente e que gostam do lugar onde trabalham. A funcionalidade de tais cidades como locais de negócios também é segura, pois as entregas e viagens de negócios podem ser planeadas e executadas de forma eficiente.
- **Maior qualidade de vida:** Menor consumo de energia reduz as emissões de GEE e melhora a qualidade do ar urbano. O espaço urbano é limitado e um sistema de transporte baseado em meios motorizados, principalmente, o TI motorizado, consome muito espaço, nomeadamente, para vias e estacionamento. Isto é à custa de parques urbanos, calçadas ou áreas de recreação. Em contraste, o TP precisa de muito menos espaço para atender a procura semelhante, o que significa que o planeamento urbano pode desenvolver vias verdes, bem como parques e outras áreas para recreação. O ruído do transporte rodoviário prejudica a qualidade de vida de muitos residentes e diminui o valor dos terrenos e dos edifícios. O transporte sustentável também reduz os riscos à saúde em termos de segurança rodoviária e poluição do ar. Além disso, como muitas pessoas nas cidades em desenvolvimento não possuem possibilidades de possuir um veículo, os investimentos em TP e meios de transporte não motorizados contam como políticas favoráveis para os mais desfavorecidos economicamente.
- **Maior segurança energética:** os subsídios aos combustíveis e outras formas de apoio ao setor automóvel pressionam o orçamento dos governos, ao mesmo tempo em que pioram a segurança energética e aumentam a dependência das importações e dos preços do petróleo. No entanto, um menor consumo de combustível devido a

medidas de eficiência energética reduz a dependência do petróleo de um estado ou regiões individuais.

- **Menos externalidades:** ao promover a importância do TP, o congestionamento do tráfego e os riscos de acidentes, podem ser reduzidos significativamente. Uma grande parte do orçamento de uma cidade é gasto na mitigação das consequências negativas do TP. Tais custos não são suportados diretamente pelo usuário, mas são impostos à sociedade. As cidades podem ter que investir em medidas de prevenção do ruído ou nos cuidados de saúde para cobrir doenças causadas pela poluição do ar e acidentes.

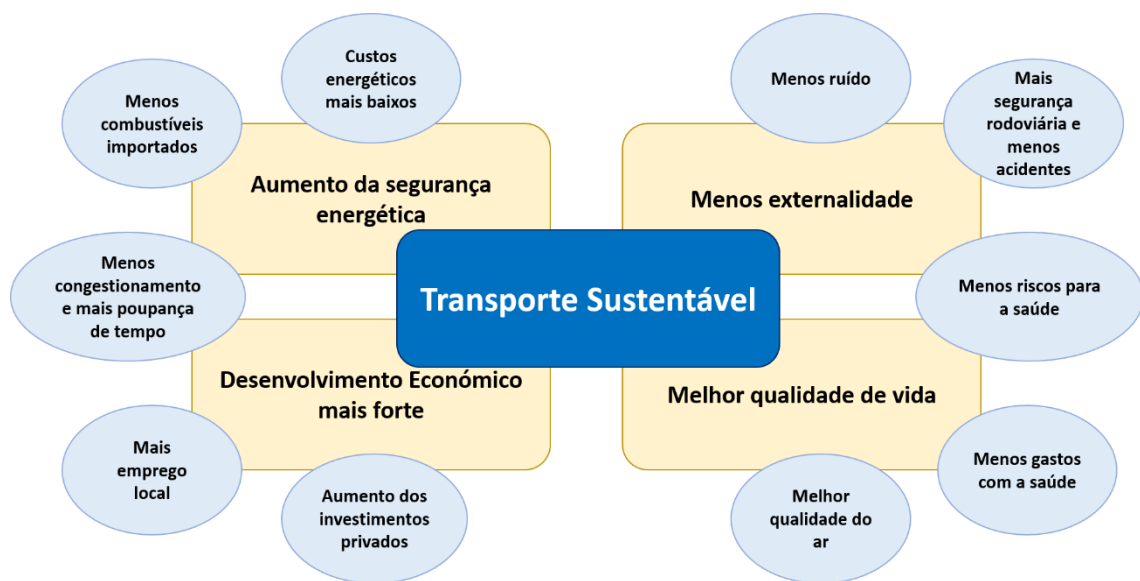


Figura 12 – Externalidades positivas do transporte sustentável (Adaptado de: Böhler-Baedeker e Hüging, 2012)

4.5 Tipos de instrumentos políticos

Para tornar o setor dos transportes sustentável, os decisores devem começar por identificar e definir os objetivos políticos e, em seguida, chegar a acordo sobre uma abordagem sistemática para alcançá-los. A abordagem ASI pode ser usada pelos decisores para identificarem as políticas mais indicadas para efetuar a transição para um sistema de transporte sustentável (Dalkmann e Brannigan, 2007).

De acordo Dalkmann e Brannigan (2007), existem vários tipos de instrumentos políticos que podem ajudar os decisores a desenvolverem um sistema de transporte urbano que seja mais sustentável e menos intensivos em carbono. Esses instrumentos políticos geralmente

promovem mudanças comportamentais com sucesso e afetam positivamente o comportamento das viagens. Esses incluem:

- O **planeamento** pode reduzir a necessidade de viajar, aproximando as pessoas e as atividades que desempenham, ou seja, o local de trabalho. O planeamento também pode permitir a implementação de novas infraestruturas de transporte (caminhadas, ciclismo, ferrovias, outros transportes públicos e rodovias).
- **Medidas regulatórias** podem ser usadas para restringir o uso de certos veículos motorizados, mas também influenciar outros tipos de transporte ou veículos e padrões que devem aderir (tanto em termos de desempenho do veículo quanto nas regras/código da estrada).
- **Instrumentos económicos** podem ser usados para desencorajar o uso de veículos motorizados, o que promoverá o uso de modos alternativos ou reduzirá a necessidade de viajar. Os instrumentos também podem melhorar a acessibilidade e a mobilidade para aqueles sem um veículo próprio, através do investimento em infraestrutura de transporte.
- A **informação** em formatos de fácil acesso pode aumentar a percepção de modos alternativos de transporte. Informações também podem ser fornecidas para melhorar o comportamento dos motoristas, resultando num menor consumo de combustível.
- A **tecnologia** pode ser usada para reduzir o impacto das emissões de GEE do transporte através do desenvolvimento de combustíveis mais limpos e da melhoria da eficiência do veículo.

Esses instrumentos podem ser implementados regionalmente (por exemplo, rede de transporte multimodal) ou em toda a cidade (por exemplo, restrições de estacionamento) numa determinada hora do dia (por exemplo, tarifas rodoviárias) e podem ter diferentes níveis de intensidade (por exemplo, política tarifária para tipos de usuários). É raro que um instrumento lide com todas as questões inerentes aos transportes ou atenda a todos os objetivos estabelecidos; por conseguinte, é importante desenvolver uma estratégia política abrangente que seja coerente e integrada e envolva vários instrumentos, a fim de alcançar os resultados que promovam o transporte sustentável de baixo teor em carbono (Dalkmann e Brannigan, 2007; Lah *et al*, 2019).

A fim de enfrentar o problema da insustentabilidade do setor de transportes, é necessário integrar as políticas de mobilidade às políticas ambientais e de ordenamento do território, assegurando uma maior participação por parte dos cidadãos, informação transparente e educação social para promover a uma filosofia de sustentabilidade integrada. Por isso, em vez de se concentrar em melhorar a eficiência energética técnica, as políticas destinadas a reduzir o uso de energia em geral devem dar uma ênfase maior à forma como essa energia é utilizada para atender às necessidades humanas (Moriarty e Honnery, 2012).

O transporte provou, e continua a provar, ser um dos setores mais difíceis de tornar mais sustentável, pois a sua taxa de crescimento é alta e é necessário apoiar economias e os estilos de vida dos cidadãos. Todavia, através da combinação de medidas bem direcionadas e precisas, a nível económico, ambiental e bem-estar social, é possível identificar tendências positivas em relação à sua transformação para um sistema de transportes sustentável (Loo e Banister, 2016).

III. Metodologia

No decorrer deste capítulo, será efetuada uma breve descrição da Metro do Porto, S.A., das variáveis escolhidas, assim como, do período temporal e das características e pressupostos do modelo utilizado.

1. Breve descrição do Metro do Porto, S.A.

O Metro do Porto é um sistema de transporte público situa na AMP, sendo constituído por uma rede ferroviária totalmente eletrificada, possuindo parte do traçado em túnel (9 km), sendo a maior parte à superfície (58 km).

A sua operação comercial iniciou-se em janeiro de 2003 com a abertura da Linha Azul. Atualmente, o Metro do Porto tem em exploração uma extensão de 67 km de rede, possuindo 6 linhas e 82 estações (14 subterrâneas e 68 à superfície) abrangendo no seu total 7 municípios da AMP³ (figura 12).

³ Porto, Maia, Matosinhos, Povoia do Varzim, Vila do Conde, Vila Nova de Gaia e Gondomar.

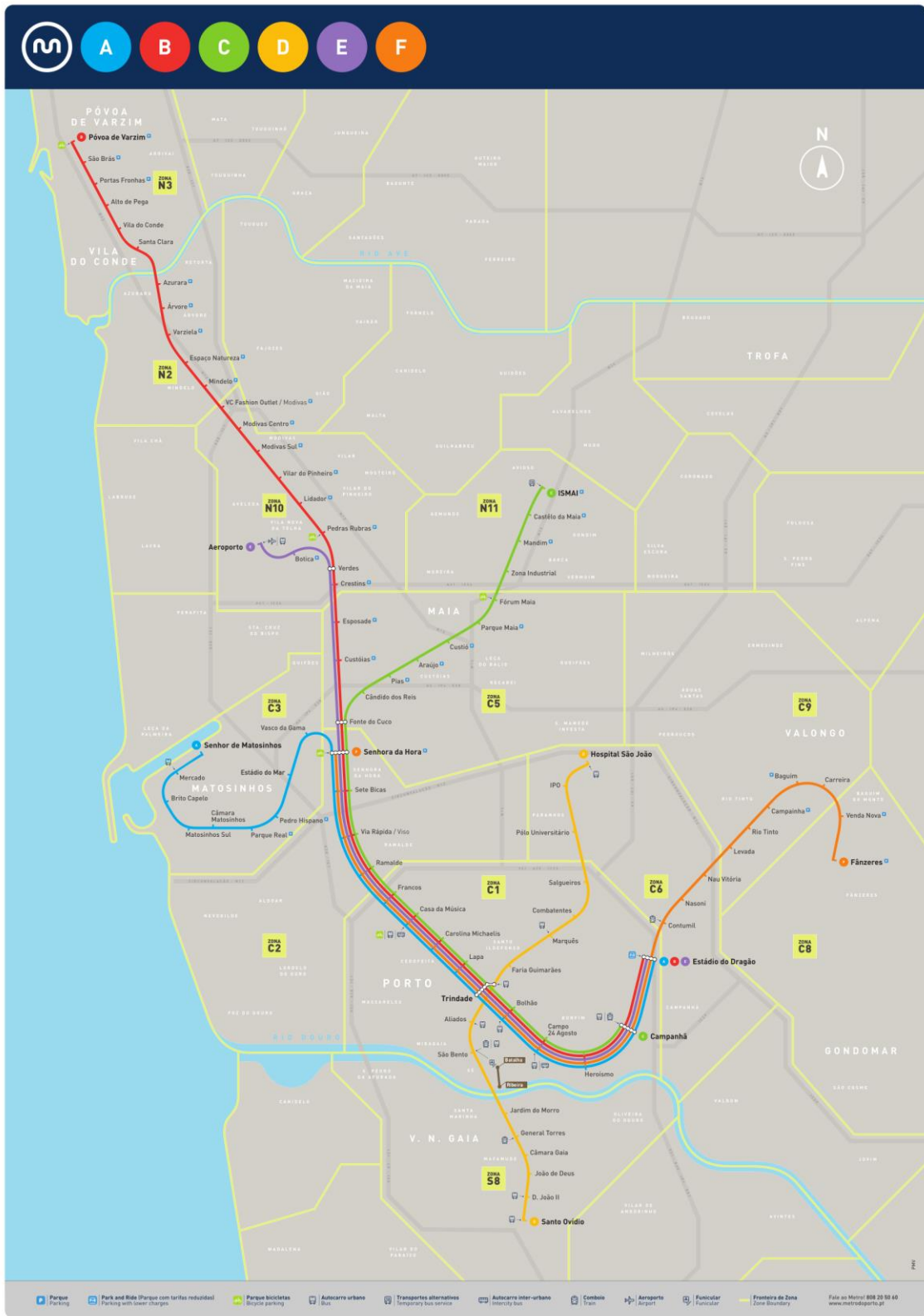


Figura 13 - Rede do Metro do Porto (Fonte: <http://mapa-metro.com/pt/Portugal/Porto/Porto-Metro-Mapa.htm>)

A frota do Metro do Porto é composta por 102 veículos, com capacidade para transportar cerca de 9 mil passageiros por hora e sentido, nas horas em que se verificam picos na procura. Esta frota é composta por dois modelos, o *Flexity Outlook Eurotram* com 72 unidades e o *Flexity Swift “Traintram”* com 30 unidades (Figura 14)⁴.



Figura 14 - *Eurotram* à esquerda e *Traintram* à direita.

Em 2018, a Metro do Porto registou um total de 62,2 mil validações, representando um novo recorde anual, superando o registado no ano anterior. Em termos de passageiros/km registou um total de 321,4 mil, 2,8% superior a 2017⁵.

2. Seleção das variáveis

Por forma a responder à questão de investigação levantada “*o que explica a variação da eficiência energética na Metro do Porto?*”, que no presente estudo é entendido como o consumo de energia de tração por passageiro por quilómetro (*ETRACAOPKM* - variável explicada), foram utilizadas as seguintes variáveis explicativas: número de estações (*EST*), veículos por quilómetro (*VKM*) e a taxa de ocupação (*TXOCUP*)

De seguida, são justificadas e fundamentadas, as escolhas das variáveis explicativas e da variável explicada.

- **Energia de Tração por passageiros*km**

O consumo de energia para operações ferroviárias pode ser medido e expresso por tonelada*km, veículo*km, carro*km, lugares*km ou por passageiro*km. Neste caso, o

⁴ <https://www.metrodoporto.pt/pages/308>

⁵ Relatório e Contas 2018. Metro do Porto. Disponível em:
<https://www.metrodoporto.pt/uploads/document/file/485/RC2018.pdf>

consumo de energia está relacionado com o número de passageiros que utilizam o metro por km produzido. Então, a energia de tração, pode ser entendida como a energia que é utilizada para a operação dos veículos, principalmente, para a propulsão e a utilização de sistemas auxiliares, como a iluminação, sistema de ar condicionado e o sistema de controlo. Segundo Jong e Chang (2005), a energia utilizada para a tração dos veículos com motores elétricos (em sistema de metro) representa a maior parcela do consumo da energia total. Na Metro do Porto, a energia de tração representa cerca de 81% do total de energia que é utilizada⁶.

De acordo com Wang e Rakha (2017), os sistemas de metro, nomeadamente os veículos, são bastante complexos, uma vez que possuem sistemas de tração e dinâmica que têm um impacto significativo no consumo de energia. Por exemplo, o sistema de tração determina como a força de propulsão é produzida e fornecida ao veículo para iniciar a marcha; já o sistema dinâmico determina como o veículo acelera ou abranda, afetando, assim, o comportamento do veículo gerando um alto impacto no consumo de energia instantânea.

Assim, o consumo de energia de tração, é influenciado por diversos fatores, tais como, o número de estações, o número de veículos em circulação, a taxa de ocupação e o tipo e estado da infraestrutura, principalmente, do traçado.

Assumiu-se como variável explicada, a energia de tração por passageiro*km (*ETRACAOPKM*), o que representa a quantidade de energia de tração utilizada para transportar os passageiros por quilómetro. Por outras palavras, representa a distância percorrida por passageiro dividido pela energia que é consumida na tração do veículo. Assim, quanto menor for a energia de tração por passageiro*km maior é a eficiência energética.

- **Número de estações**

O número de estações (*EST*) assume uma grande importância no que toca ao consumo de energia, uma vez que quanto maior for o número de estações, mais paragens serão efetuadas pelo veículo e, como consequência, mais energia será utilizada para iniciar a marcha do veículo.

De acordo com a fórmula da energia cinética⁷, esta aumenta com a velocidade ao quadrado. Então, acelerar para o dobro da velocidade (mantendo a massa constante) consumirá quatro

⁶ Relatório de Sustentabilidade 2018. Metro do Porto. Disponível em: <https://www.metrodoporto.pt/uploads/document/file/486/RS2018.pdf>

⁷ $E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$, onde E_c é a energia cinética, m é a massa e v é a velocidade.

vezes mais energia e assim sucessivamente. Como exemplo, a Figura 15 mostra a energia necessária para completar uma viagem de 160 km com uma determinada frequência de paragens em estações. É possível verificar que com menos arranques e paragens nas estações, o consumo total de energia utilizada para a aceleração diminui. Por outras palavras, quanto menor for a distância entre as estações mais energia é consumida pelo veículo para a aceleração.

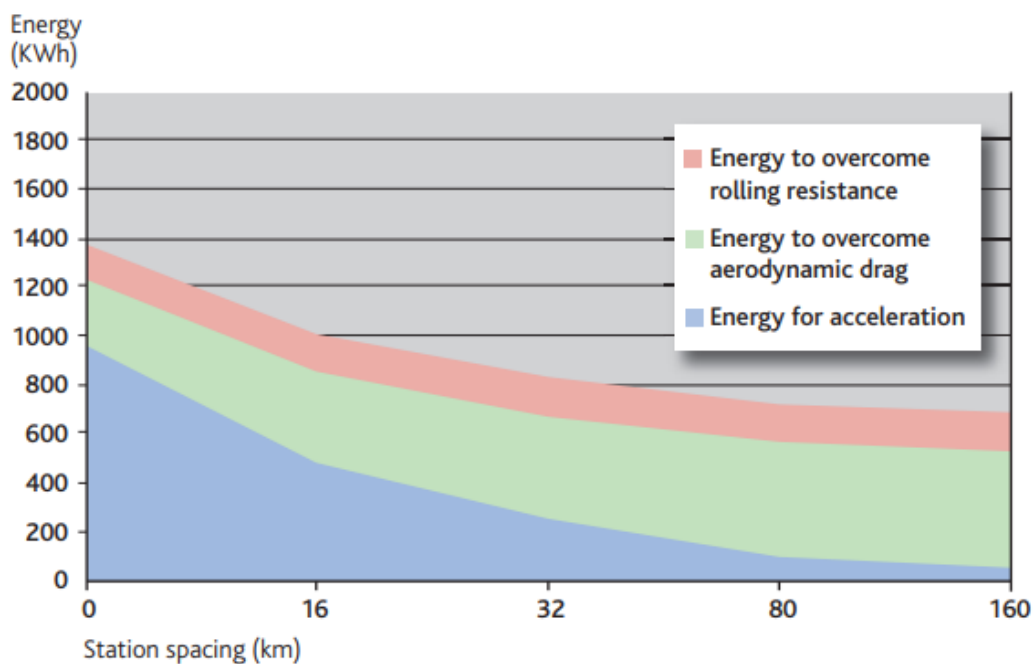


Figura 15 - Consumo de energia pelo espaçamento entre estações (Fonte: UIC, 2008)

- **Taxa de Ocupação**

A taxa de ocupação (*TXOCUP*) é definida através do rácio entre o número de passageiros por quilómetro e o número de lugares disponíveis por quilómetro. O valor real da taxa de ocupação é variável dependendo do tipo de veículo e da altura do dia. O número de passageiro, que é uma componente importante para determinar a taxa de ocupação também varia em diferentes seções e linhas do sistema de metro. Geralmente, a taxa de ocupação é maior em áreas densamente urbanizadas.

O aumento da taxa de ocupação pode implicar uma redução significativa no consumo de energia, uma vez que é transportado um maior número de passageiros numa certa distância. Porém, uma maior massa requer uma maior quantidade de energia para efetuar a aceleração e atingir a velocidade necessária. Esta situação assume uma importância mais significativa quanto a frequência das paragens e arranques é mais acentuada.

A taxa de ocupação pode originar benefícios significativos em termos de consumo energético. No entanto, está bastante dependente do tipo de veículo e de quantas composições possui, da infraestrutura (tipo de traçado, n.º de estações, etc), do sistema em si (por exemplo, se é um sistema de metro ligeiro ou pesado) e do tipo de viagens a efetuar.

- **Veículos por quilómetro**

O número de veículos*km (VKM) representa a quantidade de veículos que circula no sistema por quilómetro produzido. Esta variável pode ser entendida, de certa forma, como uma medida do fluxo de tráfego, determinado pela multiplicação do número de veículos existente na rede de metro pela distância média percorrida em quilómetros.

Este é um aspeto importante, pois, teoricamente, quanto maior for a quantidade de veículos a circular no sistema por quilómetro, maior será a necessidade de energia.

3. Período temporal

O intervalo temporal em que incide este estudo é compreendido entre 2004 e 2018. Apesar do início da operação comercial do Metro do Porto ter começado em 2003, optou-se por fazer a análise a partir de 2004 devido à indisponibilidade de dados para o ano de 2003.

4. Modelo

Para determinar a relação e, conseqüentemente, o impacto que as variáveis explicativas têm sobre a variável explicada para o período em análise, irá ser utilizado uma análise de regressão, mais precisamente, a regressão linear múltipla.

A análise de regressão tem como objetivo estudar o relacionamento entre uma variável denominada como variável explicada ou dependente e outras variáveis denominadas por explicativas ou independentes. Esta interação ou relacionamento é representado por um modelo matemático que associa as variáveis em estudo. O modelo que irá ser utilizado é o modelo de regressão linear múltipla, uma vez que a relação linear é definida através de uma variável explicada e várias explicativas.

O modelo de regressão linear múltipla assume a seguinte forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2)$$

O Y representa a variável explicada, o X_1, X_2, \dots, X_n representam as variáveis explicativas, o $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os parâmetros ou coeficientes da regressão e, por fim, o ε representa os erros do modelo.

Para efetuar a estimação dos parâmetros do modelo irá ser utilizado o método dos mínimos quadrados. Este método permite determinar os parâmetros ou o melhor ajuste para um ou vários conjuntos de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e o valor real ou observado dos dados, ou seja, os resíduos. Contudo, este método apresenta algumas exigências que é a aleatoriedade dos resíduos e que estes possuam distribuição normal. Para a aplicação deste método, do modelo e dos diversos testes necessários, irá ser utilizado o *software EVIEWS* (versão 10).

A fórmula representativa do consumo de energia de tração por passageiro.km utilizada no modelo é a seguinte:

$$ETRACAOPKM = f(EST, TXOCUP, VKM), \quad (3)$$

onde $ETRACAOPKM$ é a energia de tração por passageiro*km, $f(EST, TXOCUP, VKM)$ indica que $ETRACAOPKM$ é função de EST , $TXOCUP$ e VKM . Na tabela 1 encontram-se representadas as variáveis e a fonte dos dados.

Tabela 1 – Designação das variáveis e fonte de dados

Variáveis	Designação	Fonte
<i>ETRACAOPKM</i>	Energia de tração consumida por passageiro por quilómetro produzido	Metro do Porto
<i>EST</i>	Número de estações	Metro do Porto
<i>TXOCUP</i>	Taxa de ocupação	Metro do Porto
<i>VKM</i>	Número de veículos por quilómetro produzido	Metro do Porto

4.1. Variáveis estacionárias

Como os dados assumem uma tendência crescente o longo dos anos (Figura 16), apresentam uma natureza não estacionária. No entanto, um dos requisitos dos modelos de regressão com séries temporais utilizando o método dos mínimos quadrados é a estacionariedade dos dados.

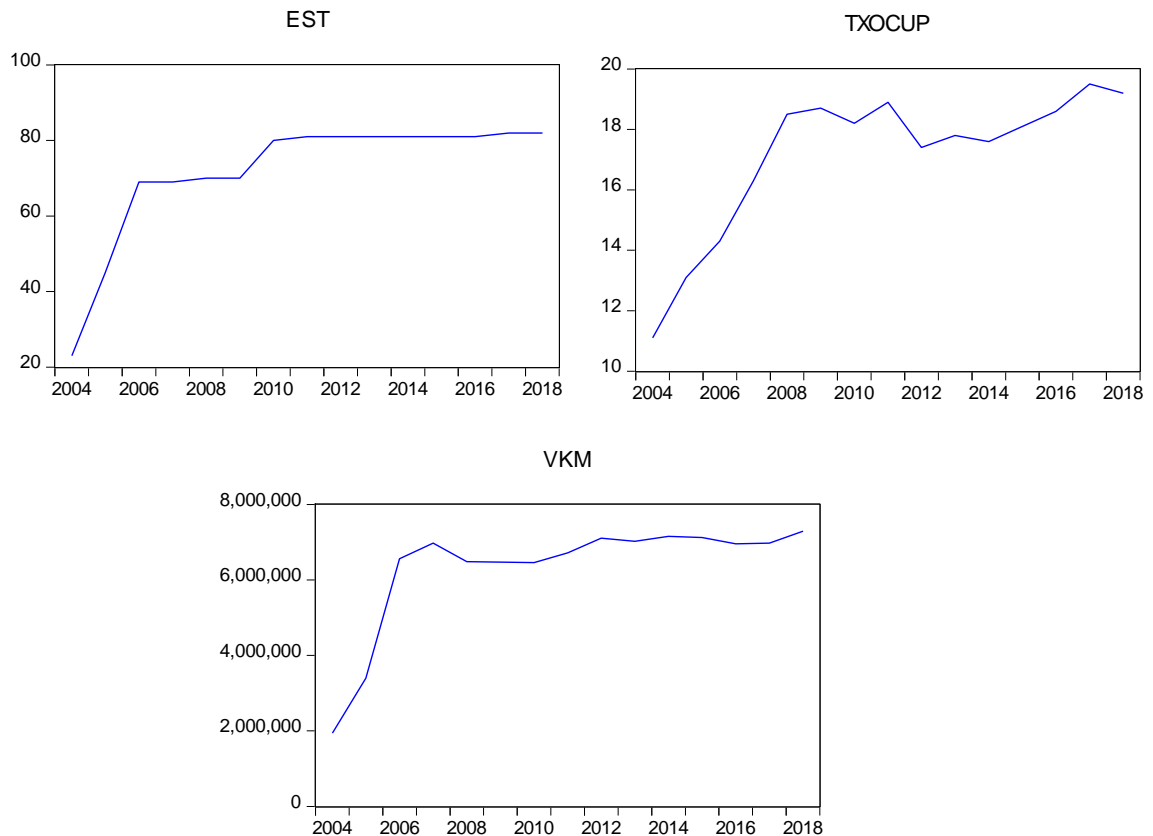


Figura 16 - Variáveis explicativas

De maneira a tornar as variáveis explicativas estacionárias ao longo dos anos irá ser efetuada a transformação dos dados através da segunda diferença. Posteriormente, através da aplicação do teste da Raiz Unitária desenvolvido por *Dickey-Fuller*, mais precisamente, o *Augmented Dickey-Fuller Unit Test*, será determinado se as séries de dados são estacionárias ao longo do tempo. O *Augmented Dickey-Fuller Unit Test* coloca em confronto a hipótese nula da existência de raiz unitária (não é estacionaria) com a hipótese alternativa da não existência de raiz unitária (é estacionária).

Através da análise do *output* do teste *Augmented Dickey-Fuller Unit Test* (Apêndice I), para cada variável explicativa, rejeita-se a hipótese nula da existência de raiz unitária, concluindo-se, assim, que as séries de dados são estacionárias ao longo do tempo.

4.2. Multicolinearidade

A multicolinearidade é entendida como a presença de correlação elevada entre as variáveis explicativas. Por outras palavras, a multicolinearidade existe quando as variáveis explicativas possuem relações lineares exatas ou muito aproximadas. A presença de multicolinearidade pode causar vários efeitos nas estimativas dos parâmetros levando a resultados falsos ou não adequados.

Como forma de se verificar a existência de multicolinearidade irá ser utilizado o VIF (*Variance Inflation Factor*). O VIF quantifica a severidade de multicolinearidade em regressões lineares. Quanto mais alto for o valor de VIF, maior é a correlação entre as variáveis. Regra geral, se $VIF > 10$, a multicolinearidade é alta (Kutner *et al*, 2004). No entanto, autores como Sheather (2009) sugere um limite de 5 para que a multicolinearidade se torne um problema no modelo.

Após a análise dos valores de VIF (Apêndice II) é possível concluir que o problema da multicolinearidade não irá causar constrangimentos, uma vez que os valores são todos inferiores a 10 e, inclusivamente, de 5.

4.3. Validação do modelo

A equação do modelo a utilizar é a seguinte:

$$DETRACAOPKM_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * DEST_t + \hat{\beta}_2 * DTXOCUP_t + \hat{\beta}_3 * DVKM_t + \varepsilon_t \quad (4)$$

A validação do modelo é realizada através de diversos testes de inferência estatística. Primeiramente, procede-se à análise dos resíduos do modelo. Esta análise é feita com recurso aos testes de autocorrelação dos resíduos, da heterocedasticidade dos resíduos e da distribuição normal dos resíduos. Para a validação do modelo é necessário que os resíduos não apresentem autocorrelação, heterocedasticidade e que possuam distribuição normal. Posteriormente, efetua-se o teste de significância global da regressão, a análise do coeficiente de determinação e o teste de significância individual.

Na realização dos testes supracitados admitiu-se um nível de significância de 5%.

4.3.1. Análise dos resíduos

4.3.1.1. Autocorrelação dos resíduos

Na verificação da existência de autocorrelação dos resíduos, recorre-se ao Teste de Autocorrelação - LM fornecido no *EViews*. Este teste é efetuado com base na hipótese nula de ausência de autocorrelação até ao *lag* especificado.

Com *output* do teste (Apêndice III) é possível confirmar que os resíduos não são autocorrelacionados, pois a hipótese nula não é rejeitada.

4.3.1.2. Heterocedasticidade

Um dos requisitos para a validação do modelo é a homocedasticidade dos resíduos. Para atestar que este requisito é satisfeito irá ser efetuado o teste de Breusch-Pagan-Godfrey como forma de verificar a existência de heterocedasticidade. O objetivo deste teste é testar a hipótese nula de ausência de heterocedasticidade com a hipótese alternativa de existência de heterocedasticidade.

Confrontando os resultados do teste (Apêndice IV), podemos dizer que não é possível rejeitar a hipótese nula, assumindo, assim, que os resíduos não possuem heterocedasticidade.

4.3.1.3. Distribuição normal dos resíduos

Por último, é necessário verificar a distribuição dos resíduos. Para tal, efetua-se o teste de Jarque-Bera que possui como hipótese nula a distribuição normal dos resíduos, que é o pretendido.

Neste caso, mantem-se a hipótese nula que determina que os resíduos possuem distribuição normal (Apêndice V).

4.3.2. Teste de significância global

Para determinar a significância global do modelo, é analisado o *p-value* resultante do Teste de F que é apresentado no *output* da regressão. A hipótese nula colocada em confronto é que nenhuma das variáveis explicativas é significativamente estatística, ou seja, não exerce

nenhuma influência sobre a variável explicada. Contrariamente, a hipótese alternativa significa que, pelo menos uma das variáveis explicativas é significativamente estatística, isto é, tem influência sobre a variável explicada.

Examinando o *output* da regressão (Apêndice VI), é possível concluir que pelo menos uma das variáveis explicativas exerce influência sobre *DETRACAPKM* (variável explicada) para um nível de significância de 5%, rejeitando, assim, a hipótese nula.

4.3.3. Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida da proporção da variação da variável explicada que é explicada pela equação de regressão quando estão envolvidas várias variáveis explicativas. O valor de R^2 pode variar entre 0 e 1, em que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajustamento. Contudo, um valor elevado de R^2 nem sempre significa que o modelo de regressão possui um bom ajustamento, pois à medida que se adicionam variáveis ao modelo este valor tende a aumentar, independentemente de que as variáveis adicionadas sejam ou não estatisticamente significativas.

Assim sendo, na análise do ajustamento da regressão é utilizado o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajustado}). Ao contrário do R^2 , o R^2_{ajustado} fornece uma melhor informação sobre a qualidade da regressão, uma vez que tem em conta o número de regressores significativos. Por outras palavras, R^2_{ajustado} nem sempre aumenta quando se adicionada uma nova variável ao modelo. Este só aumenta quando a variável adicionada ao modelo é significativa. Contrariamente, quando se adiciona uma variável desnecessária o seu valor decresce na maior parte dos casos. Um aspeto a ter em atenção é a diferença entre o R^2 e o R^2_{ajustado} , pois se a diferença for significativa é sinal que foram adicionadas variáveis estatisticamente não significativas ao modelo.

Analisando o *output* da regressão pode-se constatar que o modelo é bastante significativo apresentando valores de R^2 e R^2_{ajustado} de 0.871666 e 0.828888, respetivamente. Com isto, pode-se concluir que, aproximadamente, 83% da variação de *DETRACAOPKM* é explicada pelo modelo.

4.3.4. Teste de significância individual

O teste de significância individual, como o próprio nome indica, tem o intuito de determinar se cada uma das variáveis explicativas são estatisticamente significantes. Neste teste, a hipótese nula refere que a variável em análise não é estatisticamente significativa, ao contrário da hipótese alternativa que nos diz que é significativa. O confronto das hipóteses é determinado pelos valores dos *p-values* resultantes da regressão.

De seguida, é apresentada a tabela 2 onde estão dispostas as variáveis explicativas com os respetivos *p-values*.

Tabela 2 – *P-values* e significância estatística das variáveis explicativas

Variável explicativa	<i>p-values</i>	Significância estatística	Hipótese nula ($\beta=0$)
<i>DEST</i>	0.0427	Sim	Rejeitar
<i>DTXOCUP</i>	0.0049	Sim	Rejeitar
<i>DVKM</i>	0.0000	Sim	Rejeitar

Como é possível verificar na tabela 2, todas as variáveis explicativas têm significância estatística, uma vez que a hipótese nula é rejeitada para todas.

IV. Análise dos resultados

Como resultado da análise de regressão resulta a seguinte equação (5):

$$DETRACAOPKM = -0.004072 + 0.001890 * DEST - 0.015502 * DTXOCUP - 4.7597E^{-08} * DVKM + \varepsilon_i \quad (5)$$

Através da análise dos resultados, pode verificar-se que todas as variáveis explicativas são estatisticamente significativas. Este resultado está de acordo com o esperado, dado que tanto na evidência teórica como na aplicação prática, estas variáveis têm o potencial de causar variações no consumo energético do sistema de metro, neste caso, a energia de tração.

Como seria de esperar, a variável explicativa *DEST* influencia positivamente a energia consumida por passageiro*km, ou seja, faz aumentar o consumo de energia por passageiro*km. Quanto maior o número de estações na rede de metro, maior será o número de paragens e arranques que os veículos realizam conduzindo a um aumento do consumo de energia para efetuar essas operações. Como foi possível verificar na Figura 15, a aceleração requer uma grande quantidade de energia, assim, quanto menor for a distância entre as estações mais energia irá ser consumida. Com isto, podemos afirmar que o número de estações, e a distância entre as mesmas, afeta negativamente a eficiência energética do sistema de metro, levando a um maior consumo de energia.

Analisando o coeficiente de regressão de *DEST*, sendo este igual a 0.001890, é possível concluir que uma variação de uma unidade de *DEST* provoca um aumento de 0.001890 unidades na *DETRACAOPKM*, mantendo as restantes variáveis explicativas constantes (*ceteris paribus*).

Contrariamente, as variáveis explicativas, *DTXOCUP* e *DVKM*, influenciam negativamente o consumo de energia por passageiro*km, levando a uma redução do consumo energético, aumentando, desta forma, a eficiência energética.

Analisando especificamente a variável explicativa *DTXOCUP*, verificamos que esta tem um influencia negativa no consumo de energia de tração por passageiro*km.

Como referido anteriormente, a taxa de ocupação assume-se como um *proxy* do peso do veículo, e segundo as Leis da Física quanto maior a massa de um corpo, mais energia requer para atingir uma certa velocidade. Assim, quanto maior for o número de passageiros no veículo mais energia será necessária para atingir a velocidade desejada. Este aspeto assume

grande importância quando estamos a lidar com o consumo bruto, conforme demonstra a Figura 17 na qual é possível verificar que o aumento da taxa de ocupação acompanha o aumento do consumo de energia de tração.

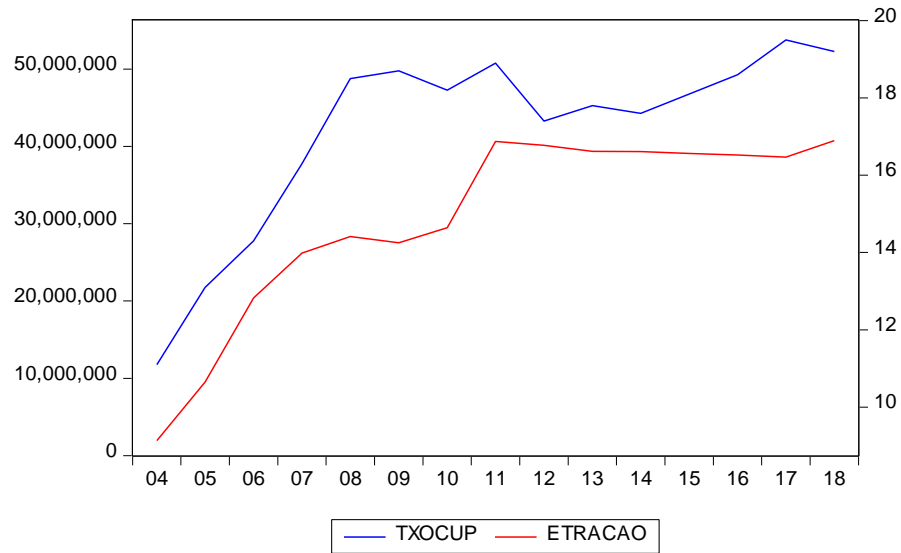


Figura 17 - Taxa de ocupação vs Energia de tração

Contudo, quando analisada a relação entre a taxa de ocupação e o consumo específico (energia de tração consumida por passageiro*km), os resultados obtidos são completamente diferentes (Figura 18). A energia de tração por passageiro*km assume um comportamento inverso à taxa de ocupação.

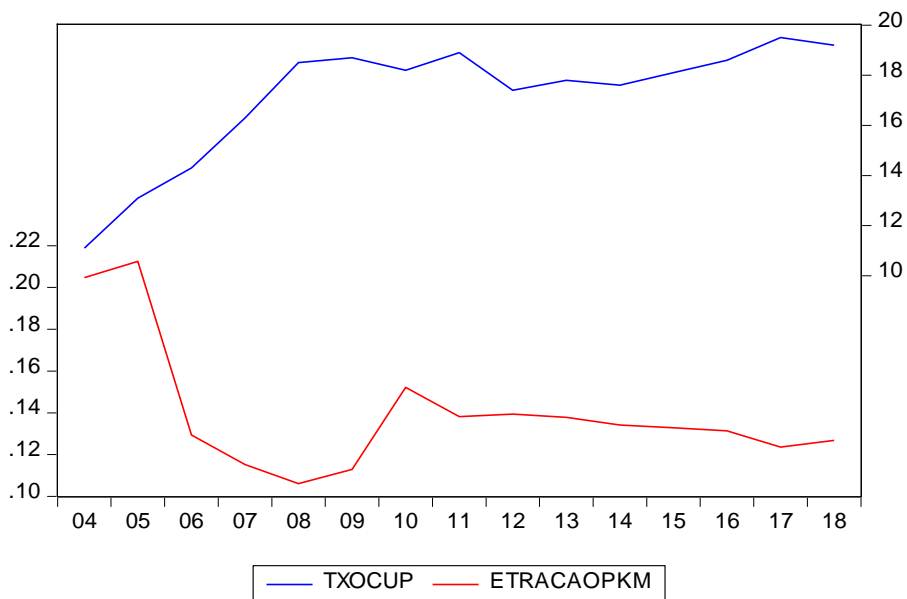


Figura 18 - Taxa de ocupação vs Energia de tração por passageiro*km

Com isto, é possível concluir que o comportamento entre a taxa de ocupação e a energia de tração por passageiro*km apresenta uma grande importância. Estes resultados estão em concordância com os apresentados por Andersson e Lukaszewicz (2006) aquando do estudo relativo ao consumo médio de energia e as emissões do transporte ferroviário da Escandinávia. Neste estudo os autores concluíram que a energia consumida medida em passageiro*km está bastante dependente do valor da taxa de ocupação.

Examinado o coeficiente de regressão de $DTXOCUP$, apresentando um valor de -0.015502 , podemos afirmar que uma variação de uma unidade de $DTXOCUP$ provoca uma diminuição de -0.015502 unidades em $DETRACAOPKM$, mantendo as restantes variáveis explicativas constantes (*ceteris paribus*).

Por fim, a variável explicativa $DVKM$, conforme referido anteriormente, possui uma influência negativa na variável $DETRACAOPKM$. Numa primeira instância, este resultado parece ser contraditório, uma vez que quando a quantidade de veículos que circula por quilómetro produzido aumenta, é expectável que o consumo energético acompanhe esse crescimento. Porém, para perceber a relação que esta variável possui em relação à variável explicada é necessário ter em conta outros fatores como o número de veículo que a frota possui, o seu percurso médio, número de linhas e também a evolução da procura, ou seja, o número de passageiro e passageiro*km.

Analisando a frota da Metro do Porto, podemos verificar o número de veículos tem permanecido constante, à exceção do ano de 2010 com a aquisição dos *Traintram*, passando de 72 para 102 veículos. Relativamente ao percurso médio, a distância média efetuada pelos veículos é de cerca de 5 100 km por ano, com a exceção o ano de 2004.

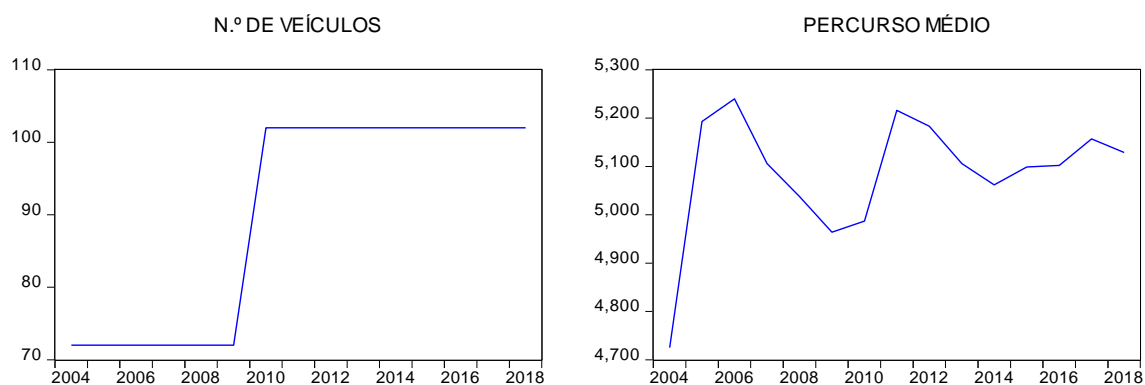


Figura 19 - Número de veículos e percurso médio

O atual número de linhas é 6, tendo sofrido sucessivos aumentos ao longo dos anos com a construção de novos troços. Em 2004, a rede de metro contava com apenas uma linha, a Linha A (Azul) que liga o Estádio do Dragão a Senhor de Matosinhos; em 2005 foram inauguradas 3 novas linhas, a Linha B (Vermelha) Estádio do Dragão – Póvoa de Varzim, Linha C (Verde) Campanhã - ISMAI e a Linha D (Amarela) Hospital de São João – Santo Ovídio; no ano de 2006 entrou em operação a Linha E (Violeta) ligando o Aeroporto Sá Carneiro com o Estádio do Dragão; por fim, em 2011 foi inaugurada a Linha F (Laranja) que conecta Fânzeres com Senhora da Hora.

A evolução da procura na Metro do Porto desde do início da operação tem apresentado uma tendência crescente (Figura 20). O ano de 2012 foi exceção, tendo-se verificado uma diminuição generalizada nos diversos operadores de transportes públicos, tanto em Lisboa como no Porto⁸. Esta diminuição está associada ao período de crise que Portugal vivia nesse período que afetou todos os setores da economia, incluindo o Setor dos Transportes.

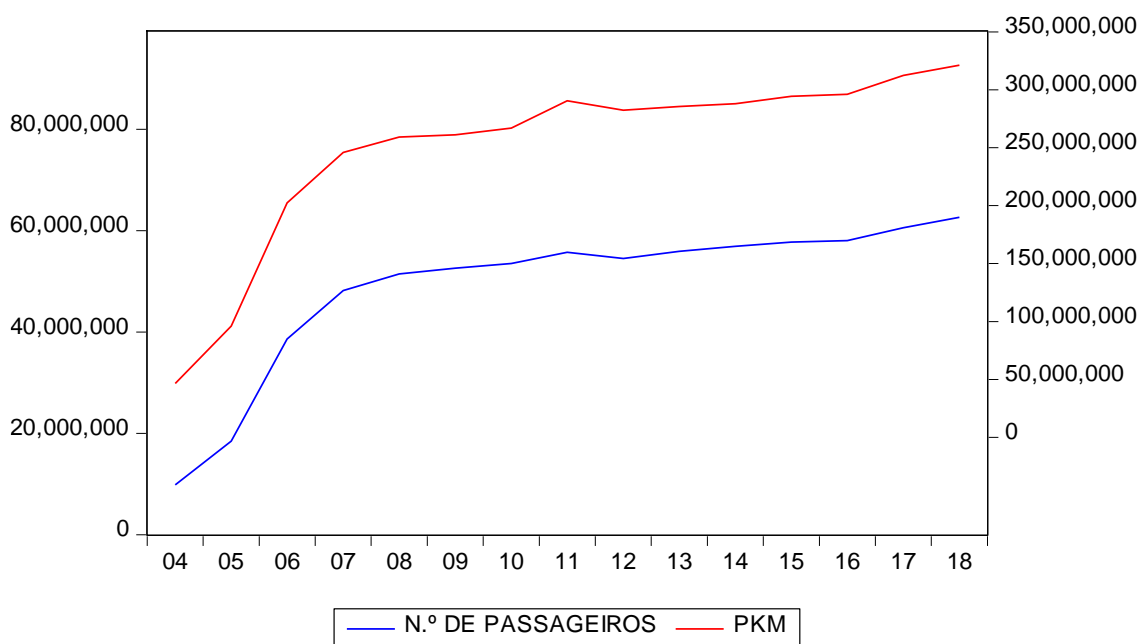


Figura 20 - Evolução da Procura

Tecnicamente, o aumento do número de quilómetros efetuado pelos veículos e o número de linhas em operação, levam a um aumento do consumo de energia de tração. Porém, o fator determinante para que a variável explicativa $DVKM$ contribua para a diminuição de

⁸ Relatório e Contas 2012. Metro do Porto. Disponível em: https://www.metroporto.pt/uploads/document/file/59/Relat_rio_e_Contas_Metro_do_Porto_2012.pdf

DETRACAOPKM é a evolução da procura. Como a variável explicada é em função do número de passageiros km, quanto maior for este valor, mantendo os restantes fatores minimamente constantes, menor será o consumo específico de energia.

Sintetizando, como o número de veículos*km tem sofrido pequenas variações ao longo do tempo (exceto de 2004 a 2006) (Figura 21) e a procura tem aumentado sucessivamente, a eficiência no transporte de passageiros aumenta. Isto é, com uma oferta, de certa forma estável, e o aumento da procura constante, resulta num maior número de passageiros transportados com um consumo de energia de tração específico mais baixo.

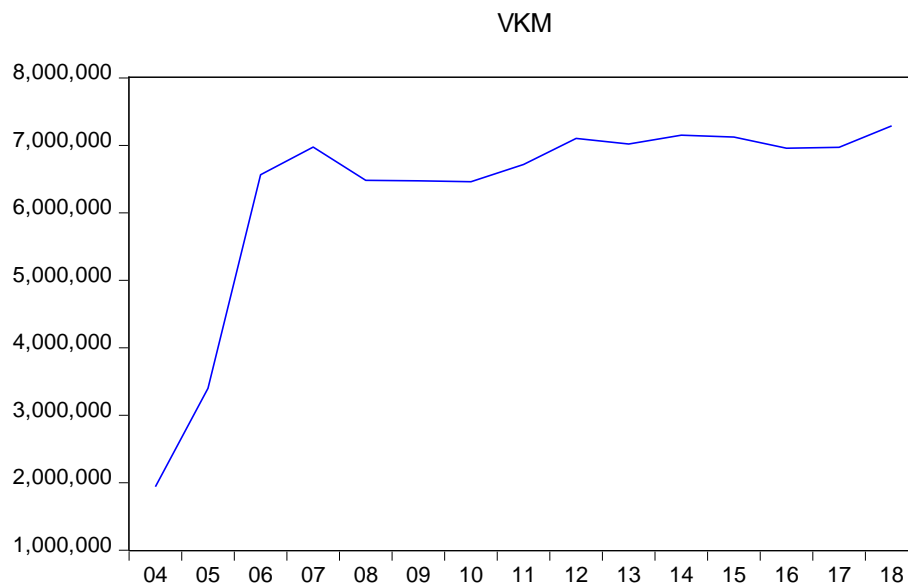


Figura 21 - Número de veículos por quilómetro

Analisando o coeficiente de regressão de $DVKM$, apresentando um valor de $-4.7597e^{-08}$, podemos afirmar que uma variação de uma unidade de $DVKM$ provoca uma diminuição de $-4.7597e^{-08}$ unidades em $DETRACAOPKM$, mantendo as restantes variáveis explicativas constantes (*ceteris paribus*).

Concluindo, pode-se afirmar que todas as variáveis explicativas usadas no modelo são importantes para a variação da energia de tração por passageiro*km. Da análise efetuada é possível concluir que o número de estações contribui para o aumento do consumo de energia de tração por passageiro*km. Por outro lado, as variáveis, taxa de ocupação e veículos*km, contribuem para a diminuição da variável explicada, levando a uma melhoria na eficiência energética. Os resultados obtidos são satisfatórios dado que a regressão obtida explica cerca de 83% da flutuação observada na variável explicada.

V. Conclusão

O Setor dos Transportes acarreta diversos impactos negativos no ambiente natural e urbano. O consumo excessivo de recursos energéticos, os níveis altos de poluentes e ruído, combinado com problemas de congestionamento e acidentes, comprometem a importância do crescimento dos transportes para elevar os padrões de qualidade de vida e desenvolvimento económico.

A mobilidade urbana é um dos maiores desafios que as cidades enfrentam por consequência da sobrelotação das cidades e do aumento da população a residir em áreas urbanas. Face a isto, a necessidade de cidades mais sustentáveis é uma das prioridades das agendas políticas atuais (Rodrigue *et al*, 2017).

A resolução do problema do transporte e da mobilidade urbana requer ações ousadas e coordenadas dos setores privados e públicos. O desenvolvimento tecnológico, o investimento, políticas inteligentes e modelos de negócio inovadores serão necessários para obter melhorias de produtividade económica, estando, ao mesmo tempo, a criar um ambiente mais sustentável nas cidades (Bouton *et al*, 2015).

As cidades precisam de sistemas de transporte eficientes para sustentar e desenvolver a economia e o bem-estar dos seus habitantes. A melhoria da eficiência energética do Setor de Transportes atende a dois objetivos principais: a redução das emissões de CO₂, assim como a dependência do petróleo (e derivados) importado. Uma política adequada para aumentar a eficiência energética no sistema de transporte, nomeadamente, urbano, deve abordar os três níveis de um transporte energeticamente eficiente: eficiência do sistema, eficiência das viagens e eficiência dos veículos.

Existe uma grande variedade de políticas e medidas com forte potencial para aumentar a eficiência energética do transporte. Para alcançar o máximo de benefícios, é necessário coordenar os vários níveis políticos e partes interessadas, por forma a agrupar as políticas e medidas em pacotes objetivos e abrangentes. Melhorar a eficiência energética dos transportes deve ser um elemento dominante na política energética nas próximas décadas.

Face à realidade atual do Setor dos Transporte e da importância da eficiência energética, surge o âmbito da presente dissertação, que se centra numa análise dos fatores que explicam a variação da eficiência energética do Metro do Porto entre 2004 e 2018. Para tal, utilizou-se uma análise de regressão, nomeadamente, a regressão linear múltipla. Por forma a

compreender a variação da eficiência energética da Metro do Porto (que é entendida como a energia de tração por passageiro por quilómetro) utilizaram-se as variáveis: número de estações, taxa de ocupação e veículos por quilómetro.

Os resultados indicam que o número de estações tem um impacto positivo sobre a energia de tração por passageiro*km, o que era esperado. A taxa de ocupação tem um impacto negativo sobre a variável explicada. Apresenta-se como um fator de grande importância, dada a sua relação inversa com a energia de tração por passageiro*km. O número de veículos por quilómetro, ao contrário do que era esperado, apresenta um impacto negativo no consumo de energia por passageiro*km. Como referido, este resultado deve-se ao facto de a procura superar a oferta, transportando mais passageiros por quilómetro conduzindo a uma diminuição do consumo específico de energia. Concluindo, e em resposta à questão de investigação proposta, é possível afirmar que o número de estações contribui para uma diminuição da eficiência energética, contrariamente à taxa de ocupação e ao número de veículos por quilómetro que contribuem para o seu aumento.

As principais dificuldades e limitações encontradas residiram na amostra de dados. A amostra utilizada esteve limitada aos anos de operação do Metro do Porto e ao limitado número de indicadores operacionais disponíveis que se enquadravam no âmbito do estudo.

No que diz respeito a trabalhos futuros seria interessante alargar o espectro da análise adicionando outras variáveis, nomeadamente, variáveis externas como: variáveis económicas, variáveis climáticas e variáveis comportamentais. Adicionalmente, como forma de tornar a análise mais abrangente e completa, a adição de outros modos de transportes, tais como, o transporte público rodoviário e individual, pode originar resultados que podem dar um contributo importante no planeamento de medidas e ações direcionadas para melhorar a eficiência energética dos transportes.

Apêndices

Apêndice I - *Augmented Dickey-Fuller Unit Test*

Null Hypothesis: DEST has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 2 (Automatic - based on SIC, maxlag=2)		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-7.075768	0.0015
Test critical values:	1% level	-5.295384
	5% level	-4.008157
	10% level	-3.460791
*MacKinnon (1996) one-sided p-values. Warning: Probabilities and critical values calculated for 20 observations and may not be accurate for a sample size of 10		

Null Hypothesis: DTXOCUP has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=2)		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-5.501588	0.0051
Test critical values:	1% level	-4.992279
	5% level	-3.875302
	10% level	-3.388330
*MacKinnon (1996) one-sided p-values. Warning: Probabilities and critical values calculated for 20 observations and may not be accurate for a sample size of 12		

Null Hypothesis: DVKM has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=2)		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-6.127302	0.0022
Test critical values:	1% level	-4.992279
	5% level	-3.875302
	10% level	-3.388330
*MacKinnon (1996) one-sided p-values. Warning: Probabilities and critical values calculated for 20 observations and may not be accurate for a sample size of 12		

Apêndice II – VIF

Variance Inflation Factors			
Sample: 2004 2018			
Included observations: 13			
Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF
C	2.14E-05	1.107158	NA
DEST	6.42E-07	1.957911	1.862749
DTXOCUP	1.75E-05	1.262744	1.234434
DVKM	4.32E-17	2.076705	2.059541

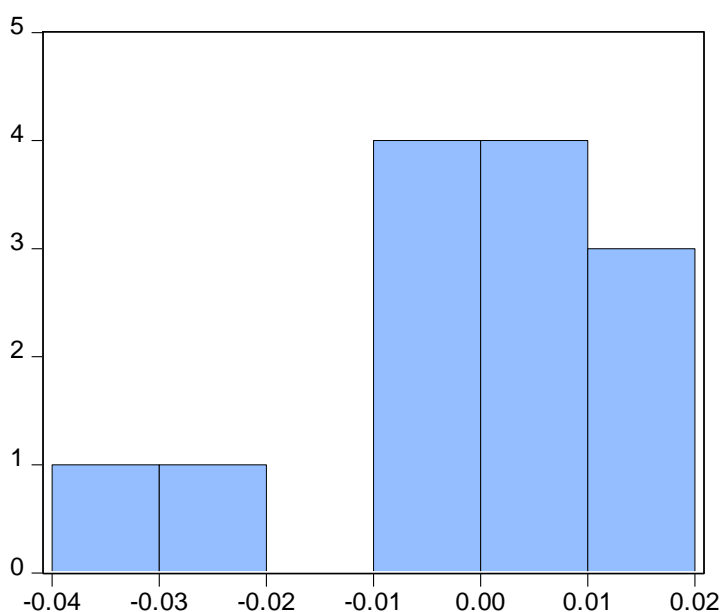
Apêndice III – Teste de Autocorrelação – LM

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:				
F-statistic	0.689156	Prob. F(2,7)	0.5331	
Obs*R-squared	2.138624	Prob. Chi-Square(2)	0.3432	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID				
Method: Least Squares				
Date: 07/07/19 Time: 17:48				
Sample: 2006 2018				
Included observations: 13				
Presample missing value lagged residuals set to zero.				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.002019	0.005094	0.396308	0.7037
DEST	0.001087	0.001245	0.872977	0.4116
DTXOCUP	-0.001162	0.004831	-0.240634	0.8167
DVKM	-6.90E-09	9.43E-09	-0.731767	0.4881
RESID(-1)	-0.133642	0.435075	-0.307169	0.7677
RESID(-2)	0.624520	0.567522	1.100434	0.3075
R-squared	0.164510	Mean dependent var	-1.33E-18	
Adjusted R-squared	-0.432269	S.D. dependent var	0.013726	
S.E. of regression	0.016427	Akaike info criterion	-5.075750	
Sum squared resid	0.001889	Schwarz criterion	-4.815004	
Log likelihood	38.99237	Hannan-Quinn criter.	-5.129345	
F-statistic	0.275662	Durbin-Watson stat	2.015358	
Prob(F-statistic)	0.912487			

Apêndice IV – Teste de Breusch-Pagan-Godfrey

Heteroskedasticity Test: Breusch-Pagan-Godfrey				
F-statistic	0.212289	Prob. F(3,9)		0.8854
Obs*R-squared	0.859124	Prob. Chi-Square(3)		0.8353
Scaled explained SS	0.552435	Prob. Chi-Square(3)		0.9072
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 07/07/19 Time: 17:47				
Sample: 2006 2018				
Included observations: 13				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.000190	9.66E-05	1.962599	0.0813
DEST	1.30E-05	1.67E-05	0.776739	0.4572
DTXOCUP	-7.05E-06	8.73E-05	-0.080835	0.9373
DVKM	-5.87E-11	1.37E-10	-0.427945	0.6787
R-squared	0.066086	Mean dependent var		0.000174
Adjusted R-squared	-0.245218	S.D. dependent var		0.000297
S.E. of regression	0.000331	Akaike info criterion		-12.94202
Sum squared resid	9.85E-07	Schwarz criterion		-12.76819
Log likelihood	88.12315	Hannan-Quinn criter.		-12.97775
F-statistic	0.212289	Durbin-Watson stat		1.684679
Prob(F-statistic)	0.885399			

Apêndice V – Teste de Jarque-Bera



Series: Residuals
Sample 2006 2018
Observations 13

Mean -1.33e-18
Median 0.002885
Maximum 0.013850
Minimum -0.032617
Std. Dev. 0.013726
Skewness -1.262144
Kurtosis 3.683228

Jarque-Bera 3.704367
Probability 0.156894

Apêndice VI – Output da regressão

Dependent Variable: DETRACAOPKM				
Method: Least Squares				
Sample (adjusted): 2006 2018				
Included observations: 13 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.004072	0.004625	-0.880301	0.4016
DEST	0.001890	0.000801	2.358852	0.0427
DTXOCUP	-0.015502	0.004181	-3.708223	0.0049
DVKM	-4.76E-08	6.57E-09	-7.240101	0.0000
R-squared	0.871666	Mean dependent var		-0.000358
Adjusted R-squared	0.828888	S.D. dependent var		0.038315
S.E. of regression	0.015849	Akaike info criterion		-5.203706
Sum squared resid	0.002261	Schwarz criterion		-5.029875
Log likelihood	37.82409	Hannan-Quinn criter.		-5.239436
F-statistic	20.37645	Durbin-Watson stat		1.944453
Prob(F-statistic)	0.000238			

Bibliografia

- Afonso, M. T. (2015). *Transporte público e mobilidade mais sustentável* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2017). *Estimativas de população exposta a ruído ambiente em Portugal Continental*. Disponível em: https://www.apambiente.pt/zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/DadosPop_exposta_Nov2017_1.pdf, acessado a 25.04.2018
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2018a). *Portuguese National Inventory Report on Greenhouse Gases, 1990-2016. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and The Kyoto Protocol*. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2018b). *Relatório do Estado do Ambiente 2018*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (n.d.). *Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC)*. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=1181>
- Andersson, E., e Lukaszewicz, P. (2006). *Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*. Stockholm, Sweden: Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology.
- Banister, D. (2007). Sustainable transport: challenges and opportunities. *Transportmetrica*, 3(2), 91-106.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80.
- Banister, D. (2011a). The trilogy of distance, speed and time. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 950-959.
- Banister, D. (2011b). Cities, mobility and climate change. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1538-1546.
- Banister, D., Dreborg, K., Hedberg, L., Hunhammar, S., Steen, P., e Akerman, J. (2000). Transport policy scenarios for the EU: 2020 images of the future. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 13(1), 27-45.

- Berger, G., Feindt, P., Holden, E. e Rubik, F. (2014). Sustainable Mobility – Challenges for a Complex Transition, *Journal of Environmental Planning & Policy*, 16;3, 306.
- Bertolini, L.; Le Clercq, F.; Straatemeier, T. (2008). Urban Transportation Planning in Transition. *Transport Policy*, n. 15, 69-72.
- Black, W. R. (2002). Sustainable transport and potential mobility. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2(3-4), 179-196.
- Böhler-Baedeker, S. e Hüging, H. (2012). *Urban Transport and Energy Efficiency*. Sustainable Transport – A Sourcebook for Decision-Makers in Developing Countries. Module 5h. GIZ. Eschborn, Germany.
- Bongardt, D., Creutzig, F., Hüging, H., Sakamoto, K., Bakker, S., Gota, S., & Böhler-Baedeker, S. (2013). *Low-carbon land transport: policy handbook*. (1st Edition). Routledge.
- Bouton, S., Knupfer, S. M., Mihov, I. e Swartz, S. (2015). *Urban mobility at a tipping point*. McKinsey Center for Business and Environment. McKinsey & Company. Disponível em: http://airportaccess.it/wp-content/uploads/2017/11/Urban_mobility_at_tipping_point_final.pdf, acessado a 22/07/2019
- Bring, J. (1994). How to Standardize Regression Coefficients. *The American Statistician*. 48:3. 209-213
- Caid, N., Crist, P., Gilbert, R., e Wiederkehr, P. (2002). *Environmentally sustainable transport: concept, goal and strategy—the OECD's EST Project*. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 153, No. 4, pp. 219-226). Thomas Telford Ltd.
- Comissão Europeia (2010). *Communication from the Commission Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. Brussels. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF>, acessado a 04.11.2018
- Comissão Europeia (2011). *Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. Brussels. Disponível em: <https://eur->

lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=PT,
acedido a 04.11.2018

Comissão Europeia (2014). *Compreender as políticas da União Europeia: Ação climática*. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia.

Comissão Europeia (2016). *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões. Estratégia Europeia de Mobilidade Hipocarbónica*. Brussels. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52016DC0501>, acedido a 04.11.2018

Comissão Europeia (2017). *Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of the Regions. Delivering on low-emissions mobility*. Brussels. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0501>, acedido a 03.11.2018

Comissão Europeia (2018). *EU Transport in figures - Statistical Pocketbook 2018*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Disponível em: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/52f721ed-c6b8-11e8-9424-01aa75ed71a1>, acedido a 28.12.2018

Costa, M. (2003). *Mobilidade Urbana Sustentável: Um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Dalkmann, H. e Brannigan, C. (2007). *Transport and climate change. Sustainable Transport – A Sourcebook for Decision-Makers in Developing Cities. Module 5e*. GTZ. Eschborn, Germany.

Dalkmann, H. e Sakamoto, K. (2011). *Transport: investing in energy and resource efficiency. Towards a Green Economy*. United Nations Environment Programme (UNEP). Geneva, Switzerland.

Dargay, J., Gately, D., e Sommer, M. (2007). Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030. *The energy journal*, 28(4), 143-171.

Estratégia Nacional de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente 2014-2020 (ENEI) (2013). *Diagnóstico de Apoio às Jornadas de Reflexão Estratégica. Eixo temático 3 – Mobilidade, Espaço e Logística*. Évora

- European Automobile Manufacturers Association (ACEA) (2018). *ACEA Report: Vehicles in use - Europe 2018*. Brussels. Disponível em: https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf, acessado a 30.12.2018
- European Environment Agency (EEA) (2017). *Road traffic remains biggest source of noise pollution in Europe*. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/highlights/road-traffic-remains-biggest-source>, acessado a 28.02.2019
- European Environment Agency (EEA) (2018a). *Final energy consumption by mode of transport*. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/assessment-9>, acessado a 25.02.2019
- European Environment Agency (EEA) (2018b). *Final energy consumption by sector and fuel*. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-9/assessment-4>, acessado a 25.02.2019
- European Environment Agency (EEA) (2018c). *GHG emissions by sector in the EU-28, 1990-2016*. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-sector-in#tab-googlechartid_chart_11, acessado a 26.02.2019
- European Environment Agency (EEA) (2018d). *Greenhouse gas emissions from transport*. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-11>, acessado a 26.02.2019
- Eurostat (2017). *Over 25 000 victims of road accidents in the EU in 2016*. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/EDN-20171119-1>, acessado a 28.02.2019
- Eurostat (2018). *Smarter, greener, more inclusive? Indicators to support the Europe 2020 Strategy*. Luxemburg: Publications Office of the European Union.
- Garau, C., Masala, F., e Pinna, F. (2016). Cagliari and smart urban mobility: Analysis and comparison. *Cities*, 56, 35-46.
- Greene, D. L., e Wegener, M. (1997). Sustainable transport. *Journal of Transport Geography*, 5(3), 177-190.

- Ibeas, A., dell'Olio, L., e Montequín, R. B. (2011). Citizen involvement in promoting sustainable mobility. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 475-487.
- Instituto Nacional de Estatística (INE) (2018). *Mobilidade e funcionalidade do território nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa 2017*. Estatísticas oficiais. Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOES_pub_boui=349495406&PUBLICACOESmodo=2, acessado a 17.12.2018
- International Union of Railways (UIC) (2008). *Process, Power, People – Energy Efficiency for Railway Managers*. Disponível em: https://uic.org/IMG/pdf/uic_process_power_people.pdf, acessado a 03.07.2019
- Jeekel, H. (2017). Social sustainability and smart mobility: Exploring the relationship. *Transportation Research Procedia*, 25, 4296-4310.
- Jong, J. C., e Chang, E. F. (2005). Models for estimating energy consumption of electric trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 278-291.
- Kordas, O., Liu, G., e Ulgiati, S. (2017). Energy and urban systems. *Applied Energy*, 2(186), 83-85.
- Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. e Neter, J. (2004). *Applied Linear Regression Models* (4th Edition). McGraw-Hill: Irwin, Chicago.
- Lah, O., Fulton, L., e Arioli, M. (2019). Decarbonization scenarios for transport and the role of urban mobility. *Sustainable Urban Mobility Pathways*, 65-80.
- Loo, B. P. Y., e Banister, D. (2016). Decoupling transport from economic growth: Extending the debate to include environmental and social externalities. *Journal of Transport Geography*, 57, 134–144.
- Loo, B., e Tsoi, K. H. (2018). The sustainable transport pathway: A holistic strategy of Five Transformations. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1).
- Lyons, G. (2018). Getting smart about urban mobility—aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 115, 4-14.
- May, A. D. (2013). Urban transport and sustainability: The key challenges. *International journal of sustainable transportation*, 7(3), 170-185.

- Moriarty, P. e Honnery, D. (2016). *Global Transport Energy Consumption. Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia* (1st Edition), Chapter 61. J.H. Lehr and J. Keeley. John Wiley and Sons, NY.
- Moriarty, P., e Honnery, D. (2012). Energy efficiency: Lessons from transport. *Energy policy*, 46, 1-3
- Mozos-Blanco, M. Á., Pozo-Menéndez, E., Arce-Ruiz, R., & Baucells-Aletà, N. (2018). The way to sustainable mobility. A comparative analysis of sustainable mobility plans in Spain. *Transport policy*, 72, 45-54.
- Nações Unidas (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. Population Division of the United Nations Department of Economic & Social Affairs. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-PressRelease.pdf>, acedida a 04.11.2018
- Nakamura, K., & Hayashi, Y. (2013). Strategies and instruments for low-carbon urban transport: An international review on trends and effects. *Transport Policy*, 29, 264-274.
- Newman, P. e Kenworthy, J. (1989). *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*. Gower. Aldershot, UK
- Observatório da Energia (OE) (2018). Energia em Números. Disponível em: <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/energia-em-numeros/>, acedido a 26.02.2019
- Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Redman, L., Friman, M., Gärling, T., e Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, 25, 119-127.
- República Portuguesa (2017). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. Ministro do Ambiente. Culturgest, Lisboa. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=6f7904fb-6b98-42ac-8be3-27a57e8e3699>, acedido a 06.11.2018
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 160/2017. *Diário da República n.º 209/2017, Série I de 2017-10-30*. Lisboa.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015. *Diário da República n.º 147/2015, Série I de 2015-07-30*. Lisboa.

Ribeiro, P., e Mendes, J. F. (2017). Planeamento de uma mobilidade urbana sustentável e eficiente: metodologia para avaliar a descarbonização do setor. *II Encontro Nacional Sobre Reabilitação Urbana e Construção Sustentável: do edifício para a escala urbana*, 279-288.

Rodrigue, J., Comtois, C. e Slack, B. (2017). *The Geography of Transport Systems* (4th Edition). New York: Routledge.

Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) (2018). Disponível em: <https://descarbonizar2050.pt/>, acessido a 06.11.2018

Seixas, J., Fortes, P., Gouveia, J. P., Simões, S. G., Pereira, A. e Pereira, R. (2017). *The Role of Electricity in the Decarbonization of the Portuguese Economy*. Universidade Nova de Lisboa e College of William & Mary.

Sheather, S. (2009). *A modern approach to regression with R*. Springer Science & Business Media.

Silva, P. T. (2015). *Qualidade de Vida Urbana e Mobilidade Urbana Sustentável na Cidade do Porto – Elaboração de um conjunto de indicadores* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Sobrino, N. e Monzon, A. (2013). Management of urban mobility to control climate change in cities in Spain. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2375), 55-61.

Steg, L., e Gifford, R. (2005). Sustainable transportation and quality of life. *Journal of transport geography*, 13(1), 59-69.

Sun, L., Lin, L., Chen, L., Liu, M., Bao, W., e Wang, L. (2016). Railway energy consumption analysis based on regression model. *In International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety*. pp. 925-934. Springer, Singapore.

Torres, H. (2007). *Eficiência, Equidade E Aceitabilidade do Pedágio Urbano* (Tese de Doutoramento). Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Brasil.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). *The Paris Agreement*. Paris. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Wang, J., e Rakha, H. A. (2017). Electric train energy consumption modeling. *Applied energy*, 193, 346-355.

WCED (UN World Commission on Environment and Development) (1987). *Our common future: report of the world commission on environment and development*.

World Health Organization (WHO) (s.d.). *Health and sustainable development – Noise*. Disponível em: <https://www.who.int/sustainable-development/transport/health-risks/noise/en/>, acessado a 28.02.2019

Yigitcanlar, T. e Kamruzzaman, M. (2018). Smart cities and mobility: Does the smartness of Australian cities lead to sustainable commuting patterns?. *Journal of Urban Technology*, 1-26.

Zawieska, J. e Pieriegud, J. (2018). Smart city as a tool for sustainable mobility and transport decarbonization. *Transport Policy*, 2018 (63), 39-50.

Zegras, P. C. (2005). *Sustainable urban mobility: exploring the role of the built environment* (Tese de Doutoramento). Massachusetts Institute of Technology, Boston.

Ziolkowska, J. R., e Ziolkowski, B. (2015). Energy efficiency in the transport sector in the EU-27: A dynamic dematerialization analysis. *Energy Economics*, 51, 21-30.

Anexo

Dados

ANO	EXT	EST	LIN	PAX	PKM	PM	VKM	TXOCUP	ETRACAO	ETRACAO_PKM
2004	15 649	23	1	9 843 039	46 506 218	4 725	1 941 132	11,1	9 517 868	0,2047
2005	34 505	45	4	18 480 539	95 978 341	5 193	3 397 895	13,1	20 395 735	0,2125
2006	58 877	69	5	38 637 488	202 472 687	5 240	6 562 195	14,3	26 203 687	0,1294
2007	58 877	69	5	48 166 631	245 920 742	5 106	6 973 738	16,3	28 333 012	0,1152
2008	59 593	70	5	51 480 735	259 361 162	5 038	6 480 483	18,5	27 536 900	0,1062
2009	59 595	70	5	52 600 420	261 117 060	4 964	6 472 450	18,7	29 487 883	0,1129
2010	66 195	80	5	53 547 220	267 063 673	4 987	6 461 692	18,2	40 657 559	0,1522
2011	66 659	81	6	55 737 262	290 699 784	5 216	6 713 891	18,9	40 149 393	0,1381
2012	66 659	81	6	54 497 816	282 480 324	5 183	7 102 654	17,4	39 376 024	0,1394
2013	66 659	81	6	55 930 831	285 591 485	5 106	7 020 175	17,8	39 353 197	0,1378
2014	66 659	81	6	56 922 846	288 136 146	5 062	7 150 723	17,6	38 659 944	0,1342
2015	66 659	81	6	57 741 485	294 450 476	5 099	7 120 719	18,1	39 093 648	0,1328
2016	66 659	81	6	58 031 000	296 076 074	5 102	6 955 750	18,6	38 897 634	0,1314
2017	66 659	82	6	60 593 229	312 468 459	5 157	6 970 958	19,5	38 631 634	0,1236
2018	66 659	82	6	62 648 912	321 357 395	5 129	7 288 912	19,2	40 755 395	0,1268

Nota: EXT – extensão (m); EST – número de estações, LIN – número de linhas; PAX – passageiros; PKM – passageiros*km, PM – percurso médio (km); VKM – veículos*km, TXOCUP – taxa de ocupação; ETRACAO – energia de tração; ETRACAO_PKM – energia de tração por passageiro*km.

FACULDADE DE ECONOMIA

