

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



**Avaliação da viabilidade económica na
substituição da frota de veículos de
combustão interna por eléctricos de um
Município**

Nuno Miguel Soares Monteiro

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadora: Professora Doutora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão

Co-orientador: Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite

25 de Junho de 2018

Resumo

As preocupações ambientais e económicas levaram as entidades públicas responsáveis pelas tomadas de decisão, a impulsionar alternativas para o transporte público e urbano. Hoje, além de outras opções, os autocarros elétricos providos de baterias estão a ser considerados. Esta tecnologia contribui para a sustentabilidade, principalmente no que diz respeito à redução de emissões de poluentes.

O veículo elétrico é uma das estratégias com maior potencial para aumentar a eficiência dos sistemas de propulsão de veículos, reduzir o consumo de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no setor dos transportes. Este setor é responsável por cerca de 25% das emissões de CO₂ mundiais.

Para avaliar efetivamente os benefícios potenciais da implementação de uma solução de transporte público baseada em autocarros elétricos, é necessário avaliar o seu desempenho em operação.

Este estudo apresenta uma análise de custo-benefício (CBA) de um autocarro elétrico urbano. O caso de estudo foi sobre a análise económica baseada no consumo de energia e veículo-quilómetros.

De uma forma geral, os resultados do estudo mostraram que os autocarros elétricos urbanos têm um bom potencial para reduzir o consumo de energia e as emissões. No entanto, atualmente, os custos de capital dos autocarros elétricos urbanos e os tempos de carregamento são ainda os fatores mais críticos para melhorar a relação custo-benefício dessa configuração de autocarro urbano alternativo.

Os resultados apresentarão como a relação custo-benefício poderia ser alcançada com essa estratégia e pretende ser um documento útil para a tomada de decisões sobre investimentos.

Abstract

Environmental and economic concerns have led the public decision-makers to push alternatives for urban and public transportation. Today, besides other options, battery-powered electric buses are being considered. This technology contributes to sustainability mainly regarding the reduction of pollutant emissions.

The electrical vehicle is one of the strategies with greater potential to increase the efficiency of vehicle propulsion systems, reduce energy consumption and carbon dioxide (CO₂) emissions in the transportation sector. This sector is itself responsible for around 25% of CO₂ emissions in the world.

To effectively evaluate the potential benefits of implementing an electric bus-based public transport solution, it is necessary to evaluate and assess its performance in operation.

This work presents a cost-benefit analysis (CBA) of an electric city bus. The case study was about the economic analysis based on energy consumption and vehicle-kilometres.

Overall, the study results showed that electric city buses have a good potential for reducing energy consumption and emissions. However, at the moment, the capital costs of city buses and charging times are still the most critical factors in improving the cost-effectiveness of this alternative city bus configuration.

The results will present how cost-effectiveness could be reached with such strategy and intends to be a document useful for decision making on investment.

Dedicatória

Dedico este trabalho às minhas primas Tita e Belita, que onde quer que elas estejam, me inspiram em tudo aquilo que eu faço.

Agradeço-vos por terem feito parte da minha vida.

As saudades apertam.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão. Obrigado por todos os conselhos, críticas e incentivos mas também por todo o entusiasmo demonstrado ao longo deste trabalho.

Também quero dirigir um agradecimento especial ao Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite por toda a sua disponibilidade, orientação, sugestões e correções que contribuíram para o resultado final do meu trabalho.

Ao Professor Doutor João Alberto Vieira Campos Pereira Claro pela prontidão em me ajudar quando eu precisei.

À Engenheira Paula Teles e ao Engenheiro Miguel Pimentel da Mobilidade PT, pelo material que me disponibilizaram na fase inicial do trabalho.

Como não poderia deixar de ser, queria agradecer aos meus pais, pela oportunidade de me deixarem chegar até aqui, pela compreensão, pela paciência, pela dedicação e por todo o carinho que me deram neste longo percurso. Obrigado.

À minha irmã Inês, pelo dom de me chamar à razão, pela sensatez, pelo carinho e por todas as vezes que me salvou a pele. És o meu orgulho.

À minha prima Joana, por todas as palavras sábias que me encheram o coração não só ao longo do meu percurso académico, mas ao longo destes meus 27 anos de vida.

Ao pessoal do J, ao Pedro, João Miguel, Bruno e Luís, pela companhia de todos os dias e das incontáveis noites de estudo. Também agradecer ao Chico pela disponibilidade em me ajudar sempre que eu precisei.

Aos meus amigos de sempre, Taveira, Piri, Nando, Quelhas e Pedro, pela amizade e por todas as aventuras que passamos ao longo de todos estes anos.

Ao pessoal da UTAD, Mesquita, Leonardo e Alex, por me terem feito sentir em casa e por terem sido a minha família nesse ano que passei em Vila Real.

Por fim, agradecer-te Margarida, pelo apoio incondicional, por toda a força que me deste, e por me tratares sempre bem, sem ti teria sido bem mais difícil. Obrigado.

Nuno Miguel Soares Monteiro

“Believe you can and you’re halfway there”

Theodore Roosevelt

Conteúdo

Abbreviations	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Enquadramento Teórico	3
2.1 Alterações Climáticas	3
2.1.1 Impacto Ambiental do Setor dos Transportes	6
2.1.2 Esforços Realizados para a Redução das Emissões a Nível Mundial	9
2.1.3 Esforços Realizados para a Redução das Emissões na União Europeia	11
2.2 Veículos Elétricos	13
2.2.1 Iniciativas de disseminação de Veículos Elétricos	15
2.2.2 Autocarros Elétricos em Operação	16
2.2.3 Disseminação dos Veículos Elétrico em Frotas de Autocarros	17
2.2.4 Bateria dos Veículos Elétricos	19
2.2.5 Infraestruturas de Carregamento	20
3 Caso de Estudo	23
3.1 Introdução	23
3.2 Obtenção de dados e Pressupostos	24
3.2.1 Comparação de Custos	24
3.2.2 Custos de Ciclo de Vida	26
3.3 Metodologia	26
3.3.1 Outros Cenários	30
3.3.2 Emissões CO ₂	31
3.4 Resultados e Discussão	32
3.4.1 Período de Recuperação do Investimento	34
3.5 Balanço Energético	35
4 Conclusões e Trabalho Futuro	37
4.1 Satisfação dos Objetivos	37
4.2 Trabalho Futuro	38
A Custos Totais de Operação	39
Referências	51

Lista de Figuras

2.1	Emissões de CO ₂ proveniente de combustíveis fósseis [4]	4
2.2	Emissão de CO ₂ por setor de consumo energético a nível Mundial, 2015 [5]	4
2.3	Recurso de Energia Primária usada a nível Mundial [4]	5
2.4	Total das emissões de GEEs por setor nos 28 países da União Europeia, 2015 [8]	6
2.5	Emissões de GEEs por atividade económica e poluente nos 28 países da União Europeia (por milhar de toneladas), 2015 [8]	6
2.6	Emissões de CO ₂ proveniente do setor dos transportes [4]	7
2.7	Crescimento dos Transportes de Passageiros, Mercadorias e Produto Interno Bruto na UE [13]	8
2.8	Emissões de GEEs no setor do Transporte na UE, 2015 [13]	8
2.9	Autocarro elétrico BYD K9 [40]	16
2.10	Autocarro elétrico CaetanoBus e.City Gold [43]	17
2.11	Layouts simplificados de diferentes configurações de autocarros (ICE=Motor combustão interna, TX=Transmissão, FD=Accionamento final, AUX=Dispositivos auxiliares, TC=Acoplador de torque, MC=Motor/Controlador, BATT=Bateria, GENSET=Motor-Gerador) [44]	17
2.12	Evolução do stock mundial de VEs, 2013-2017 [37]	18
2.13	Evolução da densidade energética e custo das baterias para VEs e VEHP [32, 48]	19
2.14	Evolução das estruturas de carregamento, 2010-2017 [37]	21
2.15	Exemplo de uma paragem de autocarro com um sistema de carregamento baseado num pantógrafo [53]	21
3.1	Linhas exploradas pelos Transurbanos de Guimarães	23
3.2	Linha 11 - Nespereira [67]	27
3.3	Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 1 VE 1	32
3.4	Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 2 VE 1	33
3.5	Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 3	33
3.6	Emissões de CO ₂ nos diferentes cenários, no horizonte temporal de 22 anos	34
3.7	Custos totais acumulados dos diferentes Cenários no horizonte temporal de 22 anos	35
3.8	Custo total do PV, discriminado por tipo de custo [81]	36
A.1	Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 1 VE 2	39
A.2	Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 2 VE 2	39
A.3	Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 1 VE 1)	40
A.4	Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 1 VE 2)	42

A.5	Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 2 VE 1)	44
A.6	Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 2 VE 2)	46
A.7	Custos de operação total C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 3)	48

Lista de Tabelas

3.1	Comparação das características dos Autocarros	25
3.2	Custo da Infraestrutura de carregamento	25
3.3	Custos de ciclo de vida	26
3.4	Idade dos veículos da frota inicial	27
3.5	Veículo-kms de 2 ^a a 6 ^a por linha	28
3.6	Veículo-kms de fins-de-Semana e feriados por linha	28
3.7	Veículo-kms anuais	29
3.8	Consumos anuais	29
3.9	Custos do consumo de energia	30
3.10	Valor de mercado dos VCIs	31
3.11	Emissões de CO ₂ por tipo de veículo	31
3.12	VAL dos diferentes cenários	32
3.13	Custo dos parques solares	36
A.1	Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 1 VE 1)	41
A.2	Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 1 VE 2)	43
A.3	Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 2 VE 1)	45
A.4	Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 2 VE 2)	47
A.5	Custos discriminados da operação do Cenário 3	49

Abreviaturas e Símbolos

AREAM	Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira
CEM	<i>Clean Energy Ministerial</i>
CH ₄	Metano
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
EBA	<i>European Battery Alliance</i>
EGCI	<i>European Green Cars Initiative</i>
EIIs	<i>European Industrial Initiatives</i>
EnU	<i>Energy Union</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
EUA	Estados Unidos da América
EVI	<i>Electric Vehicles Initiative</i>
GEE	Gases de efeito de estufa
GtCO ₂	Giga-toneladas de CO ₂
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
km	Quilómetro
ktCO ₂	Quilo-toneladas de CO ₂
kW	Quilo-Watt
kWh	Quilo-Watt hora
MI	<i>Mission Innovation</i>
MW	Mega-Watt
NASA	<i>National Air and Space Administration</i>
NOA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ppm	Partes por milhão
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
SMTUC	Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra
SET-Plan	<i>Strategy Energy Technologies Plan</i>
TUG	Transurbanos de Guimarães
UE	União Europeia
UITP	<i>Union Internationale des Transports Publics</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
VAL	Valor Atual Líquido
VCI	Veículo de Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido Plug in
WWW	<i>World Wide Web</i>
ZeEUS	<i>Zero Emission Urban Bus System</i>

Capítulo 1

Introdução

O presente documento foi elaborado no âmbito da dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e baseia-se numa avaliação da viabilidade económica na substituição da frota de veículos de combustão interna por elétricos, do município de Guimarães.

1.1 Enquadramento

As atividades do Ser Humano e a sua evolução, desde o primórdio dos tempos, estão intimamente ligadas à disponibilidade de recursos energéticos.

No início do século XIX, com a invenção da máquina a vapor, a revolução industrial levou a um avanço na forma como a energia era produzida, o que mudou para sempre os paradigmas económicos, ecológicos e sociais. Este marco histórico levou a um aumento da população mundial e à pressão exercida sobre o meio ambiente pela humanidade, consumindo recursos naturais de uma forma que os ecossistemas não conseguiam acompanhar.

Os setores com maior expressão no que a consumo de energia diz respeito, são os transportes e o da eletricidade. No entanto, este consumo de energia é feito maioritariamente através de recursos de natureza fóssil, com implicações bastantes severas para o meio ambiente, e que resultaram num aumento das emissões de gases de efeito de estufa (GEEs) e consequente degradação do meio ambiente.

Os veículos elétricos (VEs) desempenham um papel importante na solução desse problema, uma vez que são caracterizados pelo fato de não contribuírem para as emissões do GEEs, desde que a eletricidade seja produzida a partir de recursos renováveis.

De uma forma geral, se a tendência para um aumento da população mundial se mantiver, e o consequente aumento do consumo de energia, é de esperar também que o aumento de veículos particulares siga essa tendência, especialmente em países asiáticos, devido ao seu rápido crescimento económico.

O aparecimento de políticas de incentivo à aquisição de VEs, assim como a criação de condições para que uma nova cadeia de valor funcione, enquanto alternativa aos veículos de combustão

interna (VCIs) são uma peça fundamental para a diminuição da poluição do setor. Várias empresas ligadas ao sector têm feito um excelente trabalho na divulgação deste tipo de veículos e também na consciencialização da população.

Além da redução das emissões, os VEs apresentam outras vantagens, como o facto do motor elétrico causar muito menos vibrações em todo o veículo, aumentando a vida útil e reduzindo a manutenção destes, mas acima de tudo permitindo o carregamento com baixos custos, quando comparados com os VCIs.

1.2 Motivação e Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é avaliar a viabilidade económica da substituição dos VCIs de uma frota de autocarros de um município por VEs. O caso concreto é o município de Guimarães.

Para avaliar efetivamente os benefícios potenciais da implementação de uma solução de transporte público baseada em autocarros elétricos, é essencial não apenas avaliar o desempenho do veículo para cada rota individual, mas também todos os custos envolvidos na aquisição destes VEs, desde infraestruturas de carregamento até à substituição das baterias.

1.3 Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação está dividida em 4 capítulos.

No capítulo 1 faz-se uma introdução inicial ao problema. Apresenta-se de uma forma geral a motivação, o problema proposto e objetivos definidos.

O capítulo 2 consiste numa revisão bibliográfica sobre toda a envolvente relativa às áreas com vista à mitigação das alterações climáticas, assim como da evolução da mobilidade elétrica na nossa economia, que serviram como base a todo o trabalho desenvolvido. Partindo do geral para o específico, aborda-se o tema das alterações climáticas e dos esforços realizados para combater as mesmas, seguindo-se uma breve história dos VEs e barreiras como, por exemplo, a tecnologia das baterias e das estações de carregamento.

O capítulo 3 descreve o caso de estudo e a forma de obtenção de dados. De seguida, explora-se a metodologia utilizada para a resolução dos problemas identificados e objetivos propostos, terminando com a análise dos respetivos resultados.

Por fim, no capítulo 4 faz-se um balanço geral do caso de estudo, apresentam-se as principais conclusões e sugere-se direções futuras de pesquisa.

Capítulo 2

Enquadramento Teórico

Este capítulo consiste numa revisão bibliográfica dos conceitos que serviram como base a esta dissertação. Inicialmente explora-se o assunto das alterações climáticas e o seu sério impacto ambiental, apresentando-se também os esforços realizados para a redução das emissões.

Reconhecendo que os transportes representam uma fatia importante das emissões, este trabalho debruça-se sobre a transição para a mobilidade limpa.

Uma breve introdução é feita aos VEs utilitários e pesados, assim como às componentes essenciais da tecnologia como as baterias e os sistemas de carregamento.

2.1 Alterações Climáticas

A taxa de crescimento de dióxido de carbono atmosférico (CO_2) nos últimos 70 anos é quase 100 vezes superior à taxa de crescimento do final da última idade do gelo [1].

Atualmente, as alterações climáticas são o maior e mais complexo problema ambiental, agravadas pelas atividades humanas, que influenciam o padrão e a velocidade das alterações climáticas [2].

As temperaturas da superfície da Terra em 2016 foram as mais quentes desde que o registo moderno começou em 1880, 1.1 °C acima dos valores de referência da era pré-industrial, de acordo com análises independentes da *National Air and Space Administration* (NASA) e da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [1].

A concentração de CO_2 na atmosfera está a aumentar de ano para ano, à medida que queimamos combustíveis fósseis, tendo como consequência o aumento do efeito estufa natural e por sua vez o aquecimento do planeta [3]. Em 2016, a concentração média de CO_2 na atmosfera era de 403 partes por milhão (ppm), cerca de 40% maior do que em meados dos anos 1800, com um crescimento médio de 2 ppm/ano nos últimos dez anos [4].

O Quinto Relatório de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) afirma que a influência humana no sistema climático é clara. Entre as muitas atividades humanas que produzem GEEs, o consumo de energia representa, de longe, a maior fonte de emissões.

Outras atividades responsáveis pela restante fatia correspondem à agricultura, que produzem principalmente metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), de pecuária doméstica e cultivo de arroz, e a processos industriais não relacionados à energia, que produzem principalmente clorofluorcarbonetos (CFCs) e N_2O [4, 2]. Na Figura 2.1 é possível perceber um aumento dos níveis de CO_2 na atmosfera, entre 1870 e 2014.

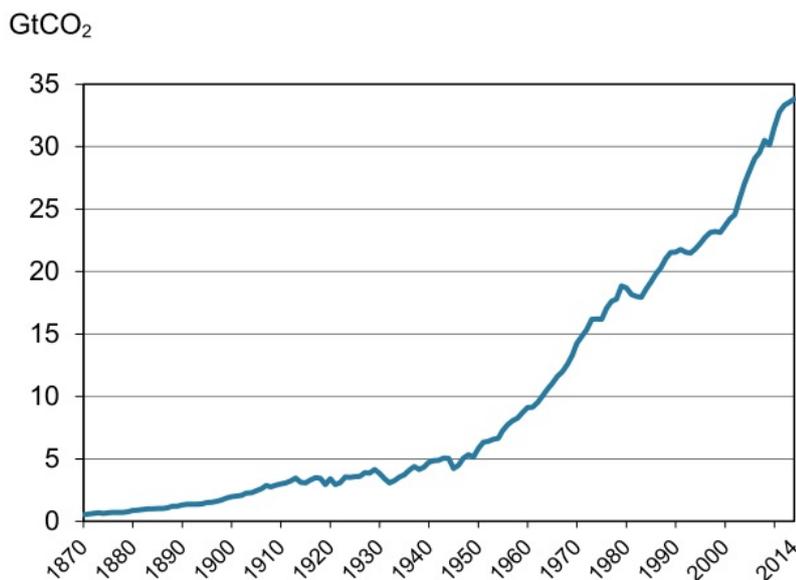


Figura 2.1: Emissões de CO_2 proveniente de combustíveis fósseis [4]

Dentro do setor de consumo energético a nível mundial, constata-se, através da Figura 2.2, que é na eletricidade, aquecimento e transportes que são emitidas mais quantidades de CO_2 , com valores na ordem dos 60% [5].

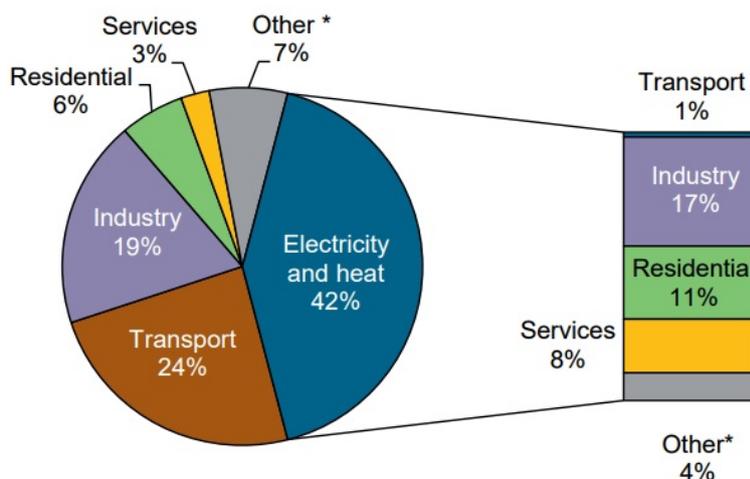


Figura 2.2: Emissão de CO_2 por setor de consumo energético a nível Mundial, 2015 [5]

O consumo de combustíveis fósseis representa cerca de 80% da matriz energética consumida a nível mundial [6]. A Figura 2.3 faz uma comparação entre os valores referentes a energia fóssil

e não fóssil, utilizada em 1971 e 2015, segundo a qual, se deu um aumento em mais de 100% na utilização de energia primária. No entanto, a percentagem de uso entre combustíveis fósseis e não fósseis, permaneceu praticamente inalterada [4, 6].

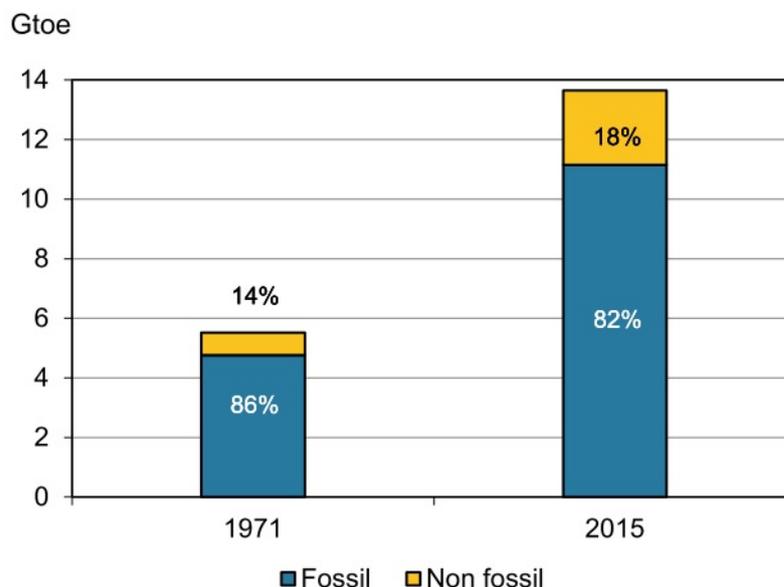


Figura 2.3: Recurso de Energia Primária usada a nível Mundial [4]

É esperado, que em 2030, seja consumido no mundo cerca de um terço mais energia do que hoje, com os países em desenvolvimento a substituir os países industrializados como o maior grupo de consumidores de energia. Combustíveis fósseis, incluindo o petróleo, carvão e o gás, continuarão a ser as fontes dominantes de energia, contabilizando mais de 90% do aumento da procura projetado. O consumo de petróleo continuará a aumentar, com o aumento da procura por parte do setor de transportes [7].

A nível Europeu, os países da União Europeia (UE) são responsáveis por cerca de 10% das emissões mundiais [4]. A energia e o transporte, de acordo com a tendência mundial, são os dois setores que contribuem para a maior percentagem de emissões de GEEs, como mostra a Figura 2.4, enquanto que na Figura 2.5 se percebe que o CO₂ tem uma maior representação nas emissões das diferentes atividades económicas.

Com a implementação da linha de montagem e da produção em série, a indústria automóvel sofreu um desenvolvimento massivo. Esse mesmo desenvolvimento também se deu no setor de fornecimento de energia (eletricidade), resultando numa revolução na sociedade. Alterando maior parte dos comportamentos sociais e mobilidade da sociedade, estes dois setores passaram a ter grande representação no consumo de energia sobre a forma de combustíveis fósseis, considerados os dois maiores responsáveis pela concentração de CO₂ e outros GEEs na atmosfera terrestre [4].

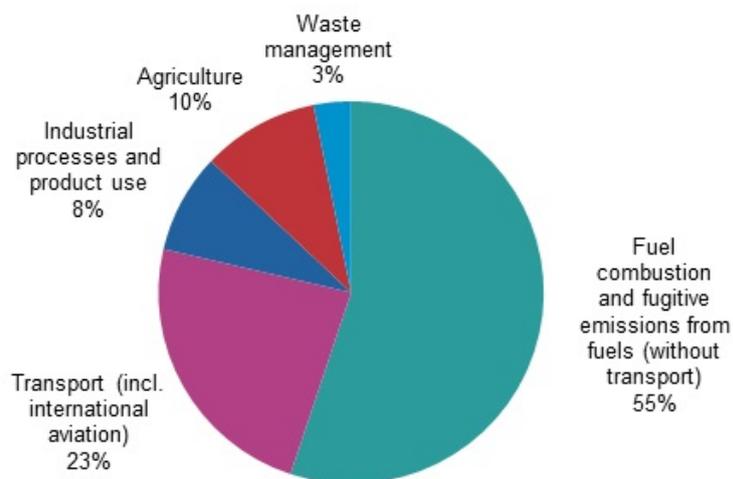


Figura 2.4: Total das emissões de GEEs por setor nos 28 países da União Europeia, 2015 [8]

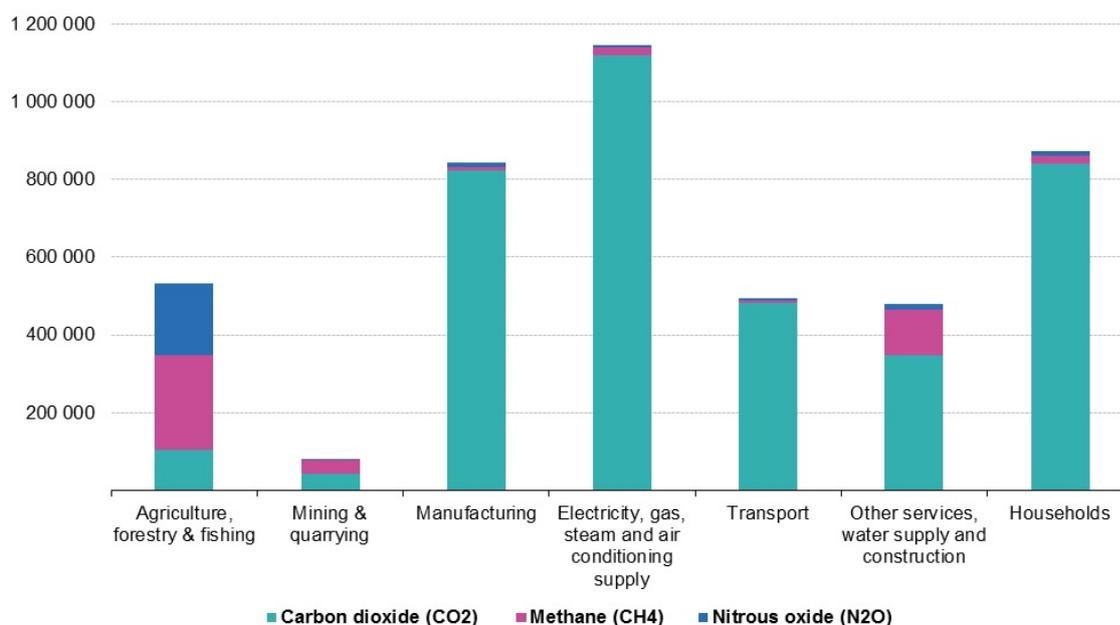


Figura 2.5: Emissões de GEEs por atividade económica e poluente nos 28 países da União Europeia (por milhão de toneladas), 2015 [8]

2.1.1 Impacto Ambiental do Setor dos Transportes

Os transportes representam um setor crucial da economia, que não pode ser ignorado em termos de emissões de GEEs e alterações climáticas, com uma representação de 24% das emissões mundiais [5].

As emissões de CO₂ estão diretamente ligadas ao crescimento económico, que é um fator importante na economia mundial, tanto para a produção quanto para o consumo. De acordo com a Figura 2.3 a maioria das emissões de CO₂ vem do consumo de combustíveis fósseis, que são uma

fonte essencial do automóvel e da indústria, que estão intimamente relacionados com o desenvolvimento e crescimento económico [9].

É estimado que a população mundial aumente em cerca de 1,5 mil milhões de pessoas, e atinja quase as 8,8 mil milhões de pessoas até 2035 [10]. Aliado a este crescimento populacional, sem uma ação global forte, o número de proprietários de veículos em todo o mundo deverá triplicar para mais de 2 mil milhões até 2050. O transporte de mercadorias feito por camião irá dobrar e as viagens aéreas podem aumentar quatro vezes. Essas tendências levam a um aumento, para o dobro, do uso de energia do transporte, com um taxa de crescimento ainda maior nas emissões de CO₂ [11].

É possível perceber através da Figura 2.6, que desde 1990 se deu um aumento de 68% das emissões no setor dos transportes, liderado pelo aumento das emissões do transporte rodoviário, que representaram três quartos das emissões deste setor em 2015 [4].

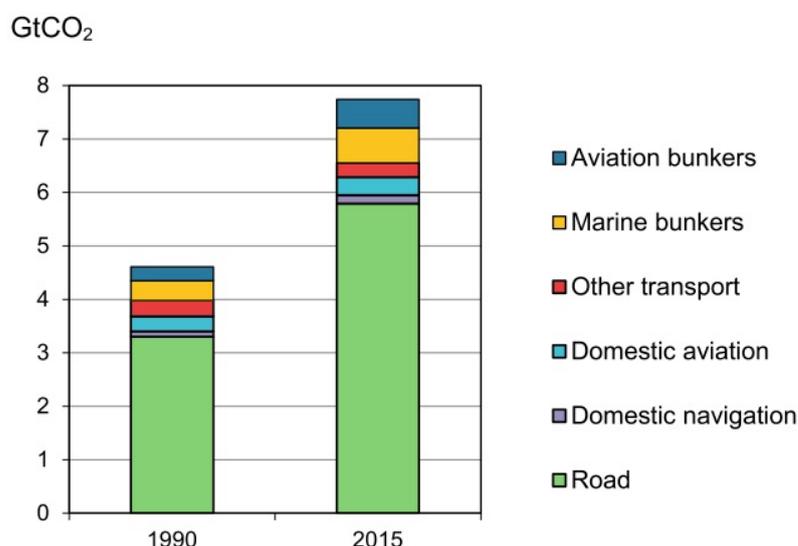


Figura 2.6: Emissões de CO₂ proveniente do setor dos transportes [4]

A UE é o maior comerciante do mundo, representando 16.5% das importações e exportações mundiais. O livre comércio entre os seus membros foi um dos princípios fundadores da UE [12]. Foram desenvolvidas estradas e vias de circulação, não só para o transporte rodoviário mas também para o transporte ferroviário, marítimo e aéreo, facilitando o livre comércio.

Em 2015, o setor de serviços de transporte e armazenamento (incluindo atividades postais) na UE empregava cerca de 11,2 milhões de pessoas. Cerca de 52% dessas pessoas trabalharam em transportes terrestres (rodoviários, ferroviários e oleodutos), 3% no transporte marítimo (mar e vias navegáveis interiores), 4% no transporte aéreo e 25% nas atividades de armazenamento, suporte e transporte (como manuseamento e armazenamento de carga) e os restantes 16% nas atividades postais [13].

O setor causou grande impacto no desenvolvimento económico dos 28 países membros da UE com a abertura das fronteiras aos seus cidadãos e às trocas comerciais, como se pode observar na

Figura 2.7. No entanto esse desenvolvimento também se traduziu num aumento das emissões de GEEs.

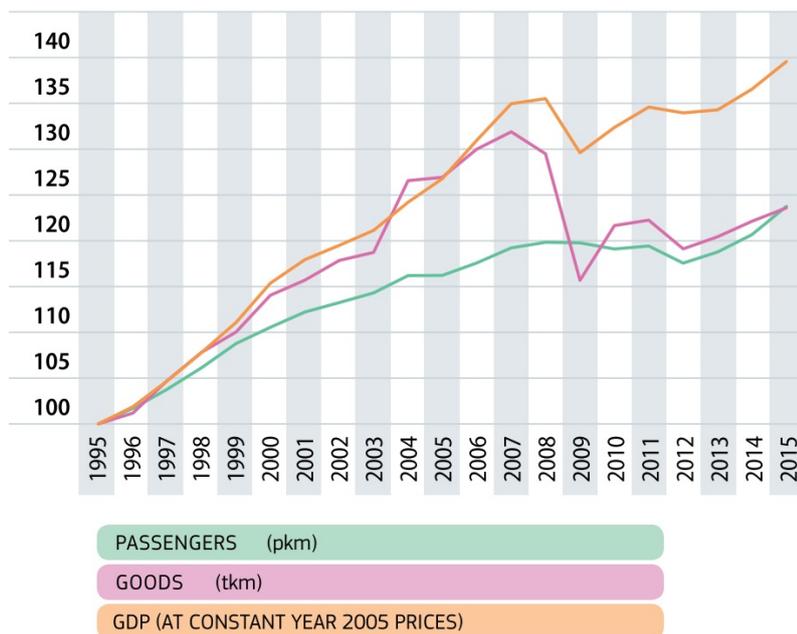


Figura 2.7: Crescimento dos Transportes de Passageiros, Mercadorias e Produto Interno Bruto na UE [13]

Como é possível observar na Figura 2.4, cerca de um quarto das emissões de GEEs da UE são causadas pelo setor dos transportes e é a principal causa da poluição do ar nas cidades. Com uma percentagem de 72,9%, o transporte rodoviário é responsável pela maior parte das emissões. Os transportes marítimos, aéreos e ferroviários, são responsáveis pela restante percentagem de emissões, com 12,8%, 13,3% e 0,5% respetivamente [13].

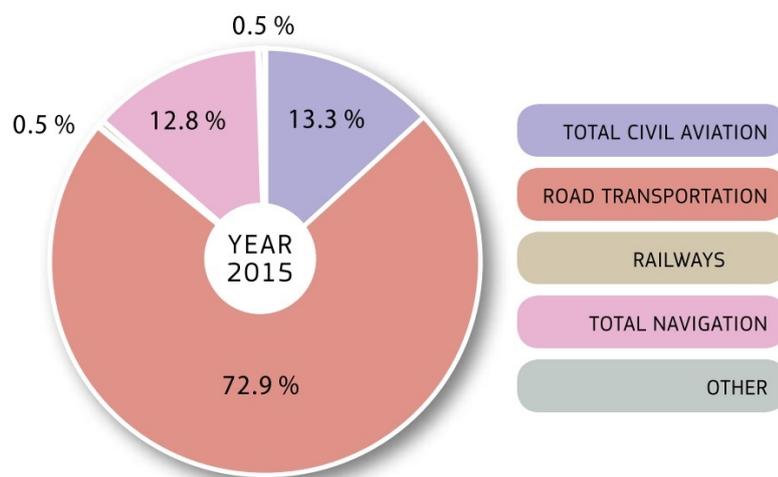


Figura 2.8: Emissões de GEEs no setor do Transporte na UE, 2015 [13]

A mobilidade de baixas emissões é um componente essencial de uma mudança numa economia mundial extremamente dependente de combustíveis fósseis. O transporte tem um potencial muito maior do que no passado para contribuir para a redução das emissões. A mudança para uma mobilidade de baixas emissões já começou globalmente, e o ritmo desta mudança está cada vez mais acelerado.

2.1.2 Esforços Realizados para a Redução das Emissões a Nível Mundial

Estudos científicos indicam que mudanças irreversíveis e potencialmente catastróficas no ambiente são cada vez mais prováveis de ocorrer se o aquecimento médio global exceder 2 °C acima da temperatura do período pré-industrial [14].

Com a consciencialização e o aumento das preocupações em relação às alterações climáticas, iniciou-se uma discussão sobre possíveis formas de diminuir o número de emissões de GEEs. Foram abordadas diversas soluções políticas e sociais, e no dia 11 de Dezembro de 1997 em Quioto no Japão, na *Conference of the Parties 3 (COP 3)*, os Estados Membros das Nações Unidas na *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)* assinaram um tratado, que ficou conhecido como Protocolo de Quioto. Este protocolo compromete os Estados Membros a reduzir as emissões de GEEs, com base no consenso científico de que o aquecimento global é uma realidade e que as emissões de CO₂ produzidas pelo Homem são a sua causa [15].

O Protocolo de Quioto é um marco na consciencialização dos efeitos das alterações climáticas. O envolvimento dos Ministros dos Negócios Estrangeiros, dos Primeiros Ministros e até mesmo dos Chefes de Estado marcou a elevação das mudanças climáticas à esfera da "alta política" [16].

Neste contexto, surgiram fóruns internacionais, formaram-se comités e grupos de trabalho para discutir e promover políticas e programas de transição para uma economia global de energia limpa.

Em Dezembro de 2009, na COP 15 em Copenhaga, o anterior Secretário da Energia dos Estados Unidos da América (EUA) Steven Chu, anunciou que Washington D.C. seria anfitrião do primeiro *Clean Energy Ministerial (CEM)*, que reúne ministros de grandes economias mundiais responsáveis pelas tecnologias de energia limpa e ministros de um número de países menores que lideram em várias áreas de energia limpa.

Com a premissa de que reunindo esforços, estes governos podem realizar mais do que a trabalhar sozinhos, as iniciativas do CEM baseiam-se em planos de ação tecnológica. Estas iniciativas têm o objetivo de dotar os responsáveis que têm poder de tomada de decisão, com informações e ferramentas para melhorar o ambiente de políticas de energia limpa em todo o mundo, e também facilitar a coordenação internacional, no sentido de amplificar os esforços de implementação de energia limpa de cada governo. As iniciativas promovidas pelo CEM assentam em 4 grupos [17]:

- Iniciativas que ajudam países e indústrias a aumentar a eficiência energética, aumentar a produtividade de energia e gerir efetivamente a procura de energia;
- Iniciativas que visam acelerar a implementação de tecnologias de fornecimento de energia limpa, como a energia solar e o vento;

- Iniciativas que visam acelerar o ritmo da descarbonização em sistemas de energia globais, ao mesmo tempo que ampliam o acesso à energia;
- Iniciativas que promovem a diversidade da força de trabalho e capacitar especialistas com políticas de apoio a uma transição mais rápida para a energia limpa.

Durante a COP 21 em Dezembro de 2015, realizada em Paris na França, foi negociado e assinado um outro tratado, conhecido internacionalmente como o Acordo de Paris.

O Acordo de Paris atraiu um interesse sem precedentes por parte dos média e foi saudado pelos seus criadores, bem como muitos observadores, como um evento decisivo e instrumental na contribuição para uma muito necessária transição global para fontes de energia limpa [18].

Segundo o Artigo 2º do Acordo de Paris, ao reforçar a implementação da Convenção, incluindo o seu objetivo, este visa fortalecer a resposta global à ameaça das alterações climáticas, no contexto do desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação da pobreza, incluindo [19]:

- Manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, e envidar esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1.5 °C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos das alterações climáticas;
- Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos das alterações climáticas e promover a resiliência à mudança do clima e um desenvolvimento de baixa emissão de GEEs, de maneira que não ameace a produção de alimentos;
- Tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento de baixa emissão de GEEs e resiliente às alterações climáticas.

O Acordo de Paris será implementado de modo a refletir igualdade e o princípio das responsabilidades comuns porém diferenciadas e respetivas capacidades, de acordo com as diferentes circunstâncias nacionais.

Também durante a COP 21 foi anunciada a criação da *Mission Innovation* (MI), uma iniciativa global de 22 países, que inclui os EUA, China, Índia e também a UE, para acelerar drasticamente a inovação global em energia limpa.

Como parte da iniciativa, os países participantes comprometeram-se a duplicar o investimento na pesquisa e desenvolvimento de energia limpa ao longo de cinco anos (atingindo um total combinado de cerca de 24,5 mil milhões de euros por ano em 2021), incentivando ao mesmo tempo um maior investimento do setor privado em tecnologias de energia limpa. O objetivo é que esses recursos adicionais acelerem drasticamente a disponibilidade de tecnologias avançadas que definirão um mix energético global limpo, acessível e seguro [20].

A MI criou um programa denominado *Innovation Challenges* que pretende impulsionar os esforços de pesquisa global em áreas que podem oferecer benefícios significativos na redução das emissões de GEEs, aumentando o acesso à energia e segurança, e à criação de novas oportunidades

para um crescimento económico limpo. Este programa foi lançado na COP 22 em Marraquexe em Marrocos, e divide-se em 7 desafios de inovação [20]:

- Desafio de inovação de *Smart Grids* - para permitir futuras redes que são alimentadas por sistemas de eletricidade renovável, confiáveis, descentralizados e acessíveis;
- Desafio de inovação de Acesso à Rede Elétrica - para desenvolver sistemas que permitam que residências e comunidades *Off-Grid* tenham acesso a eletricidade renovável acessível e confiável;
- Desafio de inovação em Captura de Carbono - para permitir emissões de CO₂ próximas de zero por parte de centrais de energia e indústrias intensivas em carbono;
- Desafio de inovação em Biocombustíveis Sustentáveis - para desenvolver maneiras de produzir, em larga escala, biocombustíveis avançados e amplamente acessíveis para transporte e aplicações industriais;
- Desafio de inovação de Conversão Solar - para descobrir maneiras acessíveis de converter a luz do sol em combustíveis solares armazenáveis;
- Desafio de inovação de materiais de energia limpa - para acelerar a exploração, descoberta e uso de novos materiais de energia limpa de baixo custo e alto desempenho;
- Desafio de inovação de Aquecimento e Refrigeração de Edifícios acessível - para tornar o aquecimento de baixo carbono e refrigeração acessível para todos.

2.1.3 Esforços Realizados para a Redução das Emissões na União Europeia

A UE além de ser membro do CEM e da MI, criou também as suas próprias iniciativas. Em 2007 foi criado o *Strategy Energy Technologies Plan* (SET-Plan), adotado em 2008, visto como um primeiro passo para estabelecer uma política de tecnologia energética para a Europa. Hoje é o principal instrumento de apoio à tomada de decisões para a política energética europeia, e tem como objetivos [21]:

- Acelerar o desenvolvimento do conhecimento, transferência e implementação de tecnologia de baixas emissões de carbono;
- Manter a liderança industrial da UE em tecnologias energéticas de baixas emissões de carbono;
- Promover a ciência para transformar as tecnologias de energia de forma a alcançar as metas de Energia e Mudança Climática de 2020;
- Contribuir para a transição mundial para uma economia de baixo carbono até 2050.

O SET-Plan tem duas metas cronológicas, a primeira em 2020 e a segunda em 2050.

Para 2020, o SET-Plan proporciona uma estrutura para acelerar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de baixo carbono, com uma boa relação custo-benefício. O objetivo da UE em 2020 é atingir as suas metas 20-20-20 de uma redução de 20% das emissões de CO₂, uma quota de 20% de energia proveniente de fontes de energia renovável e uma redução de 20% na utilização de energia primária, melhorando a eficiência energética.

Para 2050, o SET-Plan destina-se a limitar as alterações climáticas a um aumento global da temperatura não superior a 2 °C, combinando a visão de reduzir as emissões de GEEs na UE em 80 a 95%. O objetivo do SET-Plan, neste contexto, é reduzir ainda mais o custo da energia com baixo teor de carbono e colocar a indústria energética da UE na vanguarda do setor das tecnologias energéticas de baixas emissões de carbono, em rápido crescimento [21].

A implementação do SET-Plan começou com a criação das *European Industrial Initiatives* (EIIs) que reúnem a indústria, a comunidade de investigação, os Estados-Membros e a Comissão, na partilha dos riscos e na formação de parcerias público-privadas destinadas ao rápido desenvolvimento de importantes tecnologias a nível europeu. O orçamento projetado para o SET-Plan foi estimado em 71,5 mil milhões de euros.

Em estreita colaboração com outras iniciativas, tal como o SET-Plan, como o *Digital Single Market*, o *Capital Markets Union* e o *Investment Plan for Europe*, foi criada a *Energy Union* (EnU), uma das dez prioridades da Comissão Juncker, com o objetivo de proporcionar emprego, crescimento e investimentos para a Europa.

A EnU apresenta um pacote de medidas para acelerar tanto a transição de energia limpa quanto o crescimento e a criação de empregos. Mobilizará até 177 mil milhões de euros adicionais de investimento público e privado por ano a partir de 2021, podendo este pacote gerar um aumento de 1% do PIB na próxima década e criar 900 000 novos postos de trabalho. Significa também que, em média, a intensidade de carbono da economia da UE será 43% menor em 2030 do que agora, com a eletricidade proveniente de fontes de energia renovável a representar cerca de metade do mix de geração de eletricidade da UE [22].

A estratégia da EnU é composta por cinco dimensões intimamente relacionadas, e que passam por:

- Segurança, solidariedade e confiança - Diversificar as fontes de energia da Europa e garantir a segurança energética através da solidariedade e da cooperação entre os Estados-Membros;
- Um mercado interno da energia plenamente integrado - Permitir um livre fluxo de energia em toda a UE através de infraestruturas adequadas e sem quaisquer barreiras técnicas ou regulamentares, como uma forma eficiente de garantir o aprovisionamento e proporcionar aos consumidores o melhor negócio energético;
- Eficiência energética - A eficiência energética melhorada reduzirá a dependência de importações de energia, reduzirá as emissões e impulsionará o emprego e o crescimento;

- Ação climática - Políticas climáticas ambiciosas essenciais para a criação da EnU. Metas nacionais para reduzir as emissões de GEEs, políticas de implementação de mobilidade de baixas emissões e uma política energética que torna a UE líder mundial em energias renováveis;
- Pesquisa, inovação e competitividade - Apoiar avanços em tecnologias de energia limpa e de baixo carbono, privilegiando a pesquisa e inovação de forma a impulsionar a transição do sistema de energia e melhorar a competitividade.

2.2 Veículos Elétricos

O conceito de VE, apesar de se pensar que é recente, começou a ser desenvolvido no início do século XIX.

Não se pode atribuir a invenção do VE a um indivíduo, ou a um país. Foram sucessivos avanços no estudo deste conceito, por diferentes pessoas – desde as baterias aos motores elétricos – que culminou com o primeiro VE na estrada [23].

Em 1827 o eslovaco-húngaro Ányos Jedlik construiu o primeiro motor elétrico, ainda muito rudimentar, e no ano seguinte usou-o para alimentar um pequeno veículo. Em 1835 o Professor Sibrandus Stratingh da Universidade de Groningen, na Holanda, construiu também um VE de pequena escala. Também nesse ano, o americano Thomas Davenport construiu um brinquedo, uma locomotiva movida por um motor elétrico que este tinha construído no ano anterior, e o britânico Robert Anderson, algures entre 1832 e 1839, construiu uma carruagem elétrica [24].

Seguindo a tendência da época, a eletricidade, o empreendedor e inventor escocês, Robert Davidson começou a trabalhar com motores elétricos, e no ano de 1842 construiu a primeira locomotiva elétrica de tamanho real, capaz de atingir 6,4 km/h [25]. No entanto, os primeiros VEs práticos apareceram na segunda metade do século XIX, e em 1890, o americano William Morrison construiu uma carruagem elétrica capaz de transportar 6 pessoas e atingir 23 km/h, dando origem a um verdadeiro interesse nesta tecnologia [23].

No começo do século XX, os VEs atingiram o seu pico de utilização. Nos EUA, o VE representava 38% dos veículos em circulação, enquanto que os VCIs representavam cerca de 22%.

No entanto, vários fatores viriam a condicionar os VEs. Eram caros (1750-3000\$), lentos (24-32 km/h) e de curto alcance (30-60 km), embora a introdução do serviço de substituição de baterias, por volta de 1910, tenha amenizado os problemas de recarga. Além destes problemas, Henry Ford introduziu a linha de montagem, e o seu o VCI original - o Ford Model T - com um custo de 850\$ em 1908, passou a custar 440\$ em 1915 e em 1916 custava 360\$ [24]. Aliado a esta diminuição drástica no preço dos VCI, uma melhor rede de estradas inter-cidades foi estabelecida, levando à necessidade de veículos de longo alcance. Também a descoberta de petróleo no Texas reduziu o preço da gasolina, tornando esta tecnologia acessível ao consumidor médio, enquanto que ao mesmo tempo, os preços da eletricidade continuaram a aumentar. Todos estes fatores foram a razão pela qual os VEs desapareceram do mercado no final da década de 1920 [26].

Avanços tecnológicos ao nível do VE acabaram praticamente por desaparecer, iniciando uma era dominada pelos VCI, que levou à disseminação em massa deste tipo de veículos por todo o mundo [23].

Ao longo dos anos surgiram várias crises petrolíferas, e constatou-se que o setor dos transportes estava fortemente dependente de combustíveis fósseis e da sua instabilidade.

A revitalização das vendas de VEs começou no início dos anos 1970, após a primeira crise do petróleo. Por exemplo, a *General Motors* desenvolveu um protótipo de um carro elétrico urbano em 1973, e a *American Motor Company* produziu carrinhas elétricas, que o serviço postal dos EUA usou num programa de testes em 1975. Até mesmo a NASA ajudou a elevar o perfil do VE quando o seu Rover lunar elétrico se tornou o primeiro carro tripulado na Lua em 1971.

No entanto, estes veículos desenvolvidos e produzidos na década de 1970 ainda apresentavam desvantagens em comparação com os VCI, continuavam lentos - atingiam velocidades de cerca de 70 km/h - e de curto alcance (65 km) [23, 26].

O início dos anos 1990 viu um renascimento dos VEs, quando as preocupações com as questões climáticas aumentaram. Como referido no capítulo 2.1.2, inúmeros esforços foram e estão a ser realizados para mitigar as alterações climáticas, de onde também surgem políticas de apoio à investigação e desenvolvimento do VE [26].

A introdução do Toyota Prius foi um primeiro ponto de viragem. Lançado no Japão em 1997, o Prius tornou-se o primeiro carro elétrico híbrido produzido em série no mundo. Nos Veículos Elétricos Híbridos (VEHs), o motor de combustão interna é o sistema primário típico. No entanto, apresentam também um motor elétrico, alimentado por uma bateria elétrica, utilizado para auxiliar o motor principal. A bateria do VEH é carregada pelo motor de combustão interna ou através de travagem regenerativa. Como os VEHs não podem ser conectados à rede elétrica, esses tipos de veículos não podem contribuir para substituir os combustíveis fósseis [23, 26].

Com o tempo e a evolução tecnológica, foram lançados no mercado outras gerações de VEHs, como os Veículos Elétricos Híbridos Plug-In (VEHP), que permitem o carregamento das baterias através de uma fonte externa e em determinadas circunstâncias permitem um modo de condução 100% elétrico. A bateria destes veículos também pode ser carregada através de travagem regenerativa e com o motor elétrico a atuar como um gerador [26].

Em 2010, o fabricante de automóveis japonês Nissan, lançou o primeiro veículo puramente elétrico produzido em série do mundo, o Nissan Leaf, que foi lançado pela primeira vez no Japão e na América do Norte e expandido para a Europa e outros mercados em todo o mundo [27]. Os VEs são veículos que operam exclusivamente com baterias e um motor elétrico, sem motor de combustão interna [26]. Veículos puramente elétricos são, portanto, os únicos que permitem que a energia elétrica seja totalmente utilizada para gerar energia mecânica e o único tipo de automóvel que é considerado totalmente limpo.

Outros fabricantes de automóveis começaram a produzir os seus próprios VEs, à medida que a tecnologia das baterias evoluiu. O caso da Renault, com o modelo Zoe [28], a BMW com a sua gama i [29], e novos fabricantes surgiram como é o caso da Tesla Inc., uma multinacional norte-americana especializada em VEs [30].

2.2.1 Iniciativas de disseminação de Veículos Elétricos

Uma das iniciativas de disseminação de VEs mais preponderante a nível mundial é a *Electric Vehicles Initiative* (EVI). O EVI foi uma das várias iniciativas do CEM, proposta em 2010, e trata-se de um fórum político multi-governamental dedicado a acelerar a implementação de VEs em todo o mundo.

À data de Maio de 2017, faziam parte desta iniciativa dez governos membros, Canadá, China, França, Alemanha, Japão, Holanda, Noruega, Suécia, Reino Unido e Estados Unidos. De uma forma geral, os membros do EVI detêm a maioria do mercado de VEs global, e os seus objetivos passam por [31, 32]:

- Reforçar a compreensão das possibilidades que a mobilidade elétrica oferece para alcançar vários objetivos políticos;
- Apoiar a implementação de políticas e regulamentações de apoio à disseminação de VEs;
- Delinear uma visão para o futuro desenvolvimento da mobilidade elétrica e criar consenso político sobre os principais objetivos;
- Mobilizar políticas específicas e o reforçar o impacto das mesmas; por exemplo, a *Government Fleet Declaration* assinada por oito países em Novembro de 2016 - Canadá, China, França, Japão, Noruega, Suécia, Reino Unido e Estados Unidos - fortaleceu o impacto dos compromissos assumidos pelos países para aumentar a proporção de VEs nas suas frotas de governo;
- Acelerar a cobertura geográfica da implementação da política de mobilidade elétrica através da capacitação e partilha de conhecimento e experiência.

No âmbito do subcapítulo 2.1.3, em Março de 2011, o anterior Vice-Presidente da Comissão Europeia e Comissário dos Transportes, Siim Kallas, lançou oficialmente o programa *Green eMotion*.

O projeto *Green eMotion* faz parte da *European Green Cars Initiative* (EGCI), no contexto de atingir as ambiciosas metas climáticas da UE, como a redução de 60% das emissões de CO₂ até 2050. A EGCI apoia a investigação e desenvolvimento de soluções de transporte rodoviário com potencial para alcançar resultados sustentáveis e pioneiros na utilização de fontes de energia renováveis e amigas do ambiente [33].

O consórcio *Green eMotion* começou com 43 parceiros da indústria, energia, fabricantes de VEs, municípios, universidades e institutos de pesquisa, que uniram forças para explorar as condições estruturais que devem ser atendidas para uma mobilidade elétrica em toda a Europa. A base para a implantação em massa da mobilidade elétrica em toda a Europa foi estabelecida em quatro anos e o projeto teve um orçamento total de 42 milhões de euros e foi financiado pela Comissão Europeia em 24 milhões de euros [34].

Mais recentemente, o projeto *Zero Emission Urban Bus System* (ZeEUS), que decorreu entre Novembro de 2013 e Abril de 2017, mostrou-se ser um dos projetos mais importante da UE para

estender a solução totalmente elétrica ao núcleo das rede de autocarros municipais dos estados membros. Enquadra-se no contexto do objetivo da Comissão Europeia de criar um sistema de transportes competitivo e sustentável, e teve um orçamento total de 22,5 milhões de euros, em parte participado pela Comissão Europeia [35].

O projeto ZeEUS testou tecnologias inovadoras de VEs com várias soluções de infraestrutura de carregamento, em dez locais de demonstração em toda a Europa, dos quais se inclui Lisboa. Devido às características geográficas e topográficas, as demonstrações do ZeEUS confirmam a sustentabilidade económica, ecológica e social das soluções elétricas [35, 36].

2.2.2 Autocarros Elétricos em Operação

A China é o país com mais autocarros elétricos em circulação nas suas frotas [37]. Em 2008, o fabricante de autocarros chinês Ankai, disponibilizou autocarros 100% elétricos para os Jogos Olímpicos de Pequim, tornando-se assim no primeiro registo de autocarros elétricos usados em grande escala [38, 39].

Outro fabricante chinês de autocarros, e talvez o maior do mundo, é o BYD, que produz autocarros para várias cidades em todo o mundo. Recentemente, o município de Coimbra adjudicou oito autocarros elétricos à BYD, que se destinam à frota dos Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra (SMTUC) [40, 41].



Figura 2.9: Autocarro elétrico BYD K9 [40]

A China é certamente pioneira na tecnologia de autocarros elétricos, com a maior representação neste mercado, no entanto outros fabricantes querem-se afirmar, como os americanos Proterra com o seu inovador autocarro de carregamento rápido, e os portugueses CaetanoBus, especializados na conversão de antigos autocarros a diesel para veículos totalmente elétricos, e também é um dos principais fornecedores de autocarros para aeroportos [42, 43].



Figura 2.10: Autocarro elétrico CaetanoBus e.City Gold [43]

A figura 2.11 representa de uma forma simplificada a configuração dos diferentes tipos de autocarros presentes atualmente no mercado.

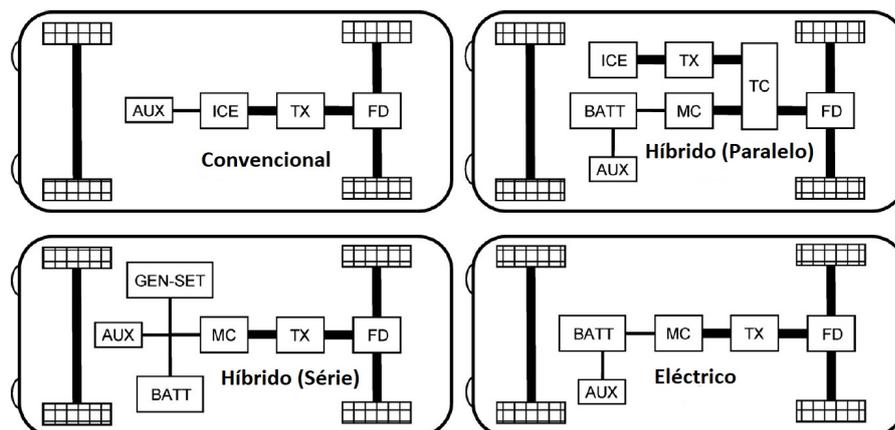


Figura 2.11: Layouts simplificados de diferentes configurações de autocarros (ICE=Motor combustão interna, TX=Transmissão, FD=Accionamento final, AUX=Dispositivos auxiliares, TC=Acoplador de torque, MC=Motor/Controlador, BATT=Bateria, GEN-SET=Motor- Gerador) [44]

2.2.3 Disseminação dos Veículos Elétrico em Frotas de Autocarros

A frota mundial de VEs ultrapassou os 3 milhões de veículos em 2017. A China é responsável por cerca de 40% da frota de VEs mundial, com o número a exceder 1 milhão em 2017, enquanto que a UE e os EUA representam, cada um, cerca de um quarto dos VEs do mundo. Enquanto o número de VEs aumenta significativamente, apenas três países membros do EVI têm uma participação de 1% ou mais: Noruega (6,4%), Holanda (1,6%) e Suécia (1,0%). [37]

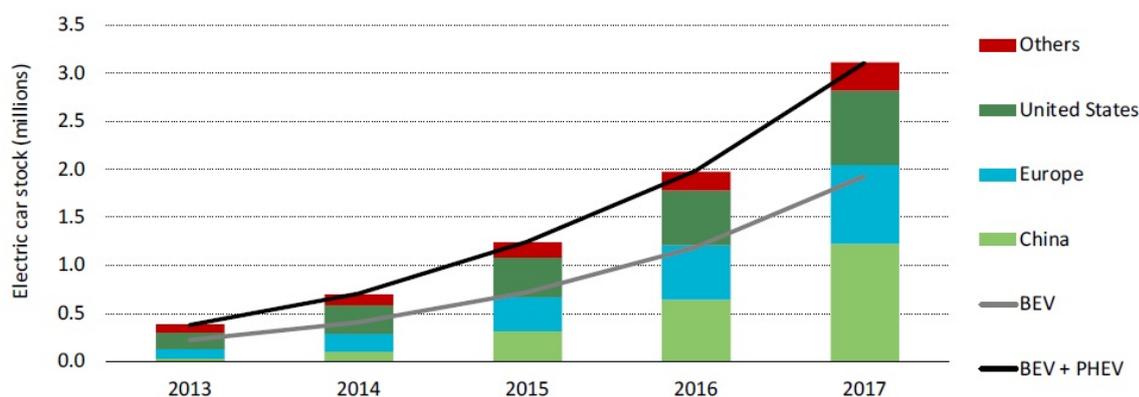


Figura 2.12: Evolução do stock mundial de VEs, 2013-2017 [37]

Com as crescentes preocupações relativas às alterações climáticas, para efeitos de segurança energética, redução de GEEs e atingir metas definidas para as emissões de poluição do ar, várias cidades mundiais estão a substituir as suas frotas de autocarros diesel, por autocarros 100% elétricos.

Os operadores de frota, tanto nas autoridades públicas como no setor privado, podem contribuir substancialmente para o uso de VEs. Em primeiro lugar, pelos sinais de procura que podem enviar ao mercado e, em segundo lugar, pelo seu papel mais amplo como amplificadores na promoção dos VEs aos seus funcionários e clientes.

Contratos e propostas de autoridades nacionais e locais, podem promover a implantação de VEs em grandes frotas de veículos públicos, incluindo veículos municipais, veículos de serviço e veículos de transporte público.

De acordo com [45, 36], os autocarros asseguram cerca de 83% do transporte público mundial (450 mil milhões de viagens). A frota de autocarros elétricos mundiais movidos a bateria cresceu para aproximadamente 345 000 veículos em 2016, o dobro dos autocarros elétricos em 2015. A China é o líder mundial destacado com cerca de 300 000 unidades em 2016, enquanto que a Europa contabilizava 1 273 e os EUA 200 unidades. Apesar de números baixos comparativamente à China, o número de autocarros elétricos na Europa também duplicou comparado ao número de autocarros elétricos em 2015 [32].

Tendo como referência estes números, percebe-se que se iniciou uma mudança de paradigma no sector dos transportes, que se deve ao facto da evolução tecnológica dos VEs, mais concretamente das baterias elétricas. No entanto, os VEs ainda apresentam algumas limitações, que faz com que a disseminação destes ainda seja feita a um ritmo lento [46]:

- Custos avultados de aquisição dos VEs, quando comparados com VCIs;
- Autonomia muito inferior aos VCIs, não permitindo percorrer longas distâncias com um carregamento, devido às limitações das baterias;
- Custos de aquisição de infraestruturas de carregamento;

O custo de aquisição dos VEs é provavelmente o fator mais preponderante a considerar, aquando da introdução destes numa frota de autocarros. Por outro lado, as limitações em termos de autonomia também são um problema. Nenhuma entidade responsável pela gestão de uma frota de autocarros de um meio urbano, está disposta a reduzir a mobilidade da cidade, de forma a que os autocarros saiam de serviço para poderem carregar.

2.2.4 Bateria dos Veículos Elétricos

Devido ao facto da indústria de baterias ainda não ter evoluído o suficiente, o preço de um VE quando comparado com o preço de um VCI, não é competitivo. O custo de bateria, representa cerca de 23% a 58% do custo total de um VE, e quanto maior a potência mais caro se torna, uma vez que o preço da bateria é medido em €/kWh [26].

Como referido no subcapítulo 2.2.3, a baixa densidade energética de uma bateria e o seu peso, representam outro problema para os VEs, uma vez que não lhes permite percorrer longas distâncias com apenas um carregamento.

No entanto, espera-se que o mercado das baterias evolua a médio/longo prazo, e como consequência, o preço das baterias baixe associado ao aumento da densidade energética, que tornará o preço dos VEs mais competitivo [47, 32].

Segundo um estudo de 2016, levado a cabo pelo Departamento de Energia dos EUA, as tecnologias atualmente em fase de investigação e desenvolvimento têm um desempenho melhor do que as tecnologias disponíveis no mercado. Quando estas baterias chegarem ao nível de produção em massa, o custo das baterias continuará a descer [32, 48].

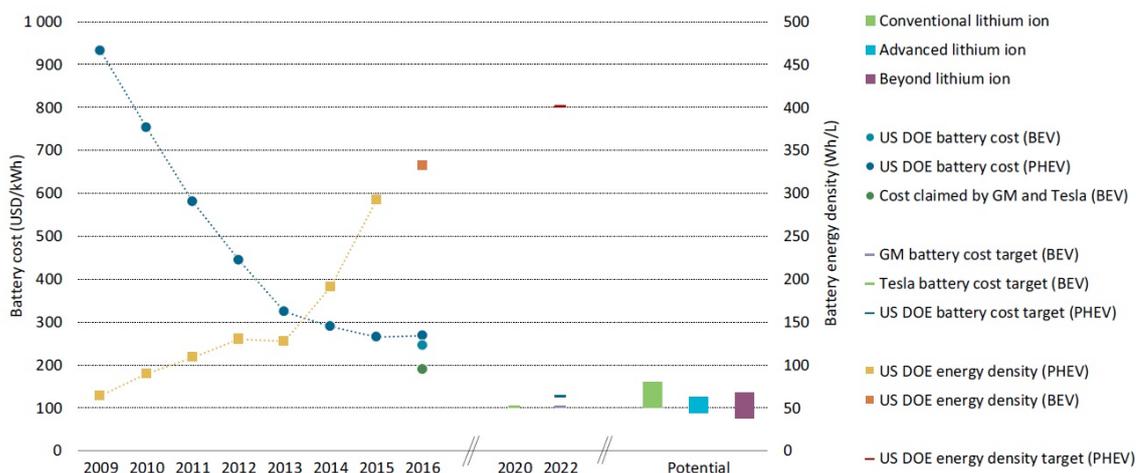


Figura 2.13: Evolução da densidade energética e custo das baterias para VEs e VEHP [32, 48]

De acordo com o subcapítulo 2.1.3, em Outubro de 2017, o atual vice-presidente da Comissão Europeia para a Energia, Maroš Šefčovič, no âmbito da EnU lançou a *European Battery Alliance* (EBA), com o objetivo de incentivar os empreendedores a produzir baterias na Europa, para serem usadas como componentes em VEs [49]. O objetivo da EBA é criar uma indústria de células de bateria competitiva e sustentável na Europa, apoiada por uma cadeia de valor completa com

base na UE [50]. O objetivo da EBA passa por evitar a dependência tecnológica de outros países como a China (líderes de mercado), e explorar o potencial das baterias em termos de emprego, crescimento e investimento.

Com o Plano Estratégico de Ação para as Baterias, a Comissão Europeia adotou um conjunto de ações e medidas para desenvolver um ecossistema inovador, sustentável e competitivo para as baterias na Europa. Este plano estratégico de ação foca-se em [51]:

- Garantir o acesso às matérias-primas para as baterias provenientes de países fora da UE, facilitar o acesso às fontes de matérias-primas europeias e o acesso às matérias-primas secundárias, reciclando as baterias numa economia de reciclagem;
- Apoiar a produção em grande escala de células de bateria, bem como uma cadeia de valor competitiva e sustentável com base na UE;
- Fortalecer a liderança industrial através de um apoio acelerado de pesquisa e inovação para tecnologias avançadas (por exemplo, iões de lítio) e disruptivas (por exemplo, estado sólido);
- Desenvolver e reforçar uma mão-de-obra altamente qualificada ao longo de toda a cadeia de valor para colmatar as lacunas de competências, incluindo a formação adequada a nível da UE e nacional, a reciclagem, a formação contínua e a participação dos principais especialistas europeus neste domínio;
- Apoiar a sustentabilidade da indústria transformadora de células de bateria da UE com a menor pegada ambiental possível, incluindo a definição de requisitos para uma produção segura e sustentável de baterias na Europa;
- Garantir a coerência com o quadro regulamentar e de autoridade da UE em geral (estratégia da energia limpa e pacotes de mobilidade, políticas comerciais, etc.).

2.2.5 Infraestruturas de Carregamento

A infraestrutura de carregamento, seja em casa, no trabalho ou em locais públicos, é essencial para a operação de VEs. Estas têm de ser desenvolvidas e situadas em pontos estratégicos, tal como acontece com os pontos de abastecimento dos VCIs.

Como é possível observar na figura 2.14, os pontos de carregamento dos VEs em todo o mundo, atingiram os 3,5 milhões em 2017, acompanhando a evolução do stock mundial de VEs (figura 2.12).

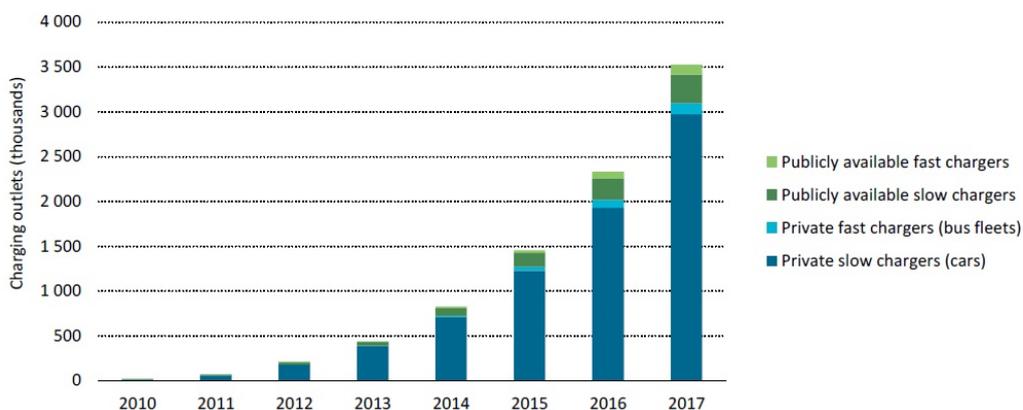


Figura 2.14: Evolução das estruturas de carregamento, 2010-2017 [37]

A nível dos transportes públicos, nomeadamente, transporte de passageiros feito por autocarros, a questão da localização dos pontos de carregamento é alvo de vários estudos. Devido aos problemas ainda existentes, a nível das baterias que se traduzem em baixas autonomias comparativamente aos VCIs, é necessário realizar-se estudos de consumo e planeamento das rotas [52].

Habitualmente os pontos de carregamento situam-se nas centrais de autocarros, ou nos parques de estacionamento dos mesmos. Esta situação é viável para autocarros que necessitem de percorrer poucos km diários, no entanto necessitam sempre de voltar ao ponto de partida para proceder ao carregamento.

Outras tecnologias em desenvolvimento, e algumas delas já existentes, prometem mudar o mercado dos autocarros elétricos. Empresas como a Heliox e a Siemens, desenvolveram infraestruturas de carregamento baseado num pantógrafo que se conecta com a parte superior dos autocarros elétricos e os carrega. Estes pantógrafos estão localizados em determinadas paragens de autocarro, ou então nos próprios autocarros. A ideia é manter o autocarro na estrada o dia todo em operação, sem ter que fazer viagens até ao local dos pontos de carregamento para abastecer [53, 54].



Figura 2.15: Exemplo de uma paragem de autocarro com um sistema de carregamento baseado num pantógrafo [53]

Capítulo 3

Caso de Estudo

Neste capítulo apresentam-se o caso de estudo abordado nesta dissertação. É descrito a proveniência dos dados utilizados bem como é descrito quais os pressupostos assumidos para este estudo. De seguida é explicado qual a metodologia seguida para a realização da avaliação económica. Por fim são apresentados os resultados obtidos deste estudo.

3.1 Introdução

Tendo como motivação a candidatura do Município de Guimarães a Capital Verde Europeia 2020, o caso de estudo assenta sobre os Transurbanos de Guimarães (TUG).

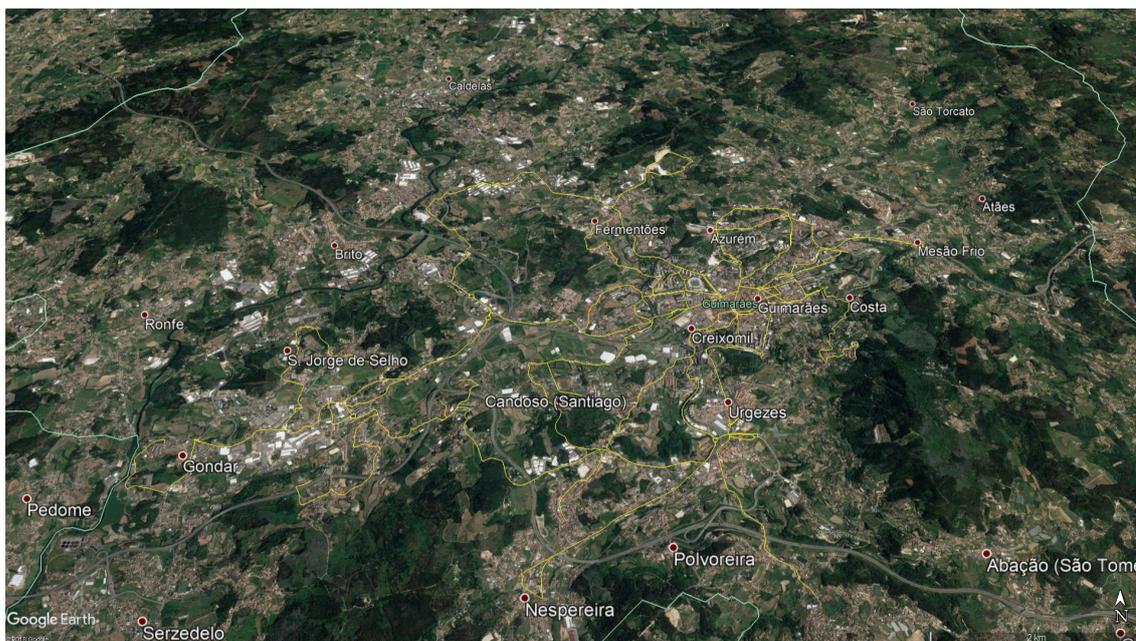


Figura 3.1: Linhas exploradas pelos Transurbanos de Guimarães

Nesta concessão gerida pela Arriva Portugal, os TUG são responsáveis pela exploração de 19 linhas, com uma extensão de 188,7 km, praticamente confinados ao perímetro urbano do concelho. A empresa conta com uma frota de 28 autocarros diesel, com uma idade média de 10,5 anos.

O objetivo do caso de estudo é avaliar a viabilidade económica na substituição da frota de VCIs dos TUG por VEs.

Essa avaliação é relativa aos custos de operação nas várias linhas.

3.2 Obtenção de dados e Pressupostos

Este documento otimiza as decisões de substituição de frota num ambiente onde autocarros convencionais a diesel (já estabelecido) competem com autocarros elétricos, comparando dois tipos de autocarros da mesma categoria (tamanho) para uma comparação justa.

Os dados relativos aos consumos e autonomias dos VCIs foram obtidos em conformidade com os VCIs já existentes na frota dos TUG, veículos com motor de norma *Euro V* segundo o Padrão Europeu de Emissões. A título de exemplo, usou-se os dados de consumo e autonomia fornecidos pelo fabricante do Mercedes Citaro Euro V (veículo atualmente em operação nas linhas TUG) [55].

Relativamente aos VEs propostos para este caso de estudo, os dados de consumo e autonomia foram obtidos a partir de um relatório de testes no âmbito do projeto ZeEUS, coordenado pela *Union Internationale des Transports Publics* (UITP), em várias cidades europeias - das quais inclui Lisboa - e o projeto DESTINATIONS, inserido na iniciativa CIVITAS, sob a coordenação da Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira (AREAM). Ambos os projetos foram cofinanciados pela Comissão Europeia [36, 56].

3.2.1 Comparação de Custos

Foram comparados dois VEs com consumos diferentes, autonomias diferentes, sistemas de baterias diferentes, bem como tempos de carregamento diferentes e custo de aquisição diferentes.

No entanto, devido à falta de dados de operação no terreno, foi assumido que estes consumos são 15% superiores aos estipulados pelos fabricantes. Esta margem sobre os consumos foi atribuída numa tentativa de aproximação à realidade, em que estes podem variar consoante a tipologia do terreno bem como a intensidade do trânsito e a condição das estradas. No caso dos VEs, é assumido que a travagem regenerativa está incluída nos consumos disponibilizados. Estes consumos estão em conformidade com o relatório de testes do projeto ZeEUS, bem como do projeto DESTINATIONS.

Também devido à falta de dados de operação no terreno, não foi assumido que à medida que os veículos envelhecem os consumos aumentam.

Tabela 3.1: Comparação das características dos Autocarros

	VCI	VE 1	VE 2
Consumo	0,488 l/km	1,192 kWh/km	1,240 kWh/km
Autonomia (km)	574,24	260,87	278,26
Preço (€)	220 000	500 000	
Preço da Energia	1,455 €/l	0,137 €/kWh	
Custo por km (€/km)	0,7095	0,1636	0,1702

Os autocarros elétricos são mais caros de produzir do que os autocarros convencionais a diesel, e a maioria dos custos adicionais consiste em componentes elétricos caros, como a bateria, motor elétrico e eletrónica de potência. O preço dispara muito devido aos sistemas de baterias de grande porte. Estes componentes podem aumentar a eficiência energética, mas como o mercado desses componentes ainda é pequeno, os seus custos são bastante elevados [57, 44]. Como é possível observar na tabela 3.1, foi assumido o preço dos VEs como sendo praticamente o dobro do preço de um VCI [44]. No entanto, espera-se que o preço dos VEs decresça quando estes forem produzidos em série e com a evolução tecnológica dos sistemas de baterias, que fará com que o preço dos VEs seja mais competitivo [57].

O preço da energia usado, referente ao VCI, foi o preço do combustível à data de 05/06/2018, enquanto que o preço da energia para carregar os VEs foi obtido no portal da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) [58, 59]. Para este último, foi feita uma média ponderada (70%-30%) das Tarifas Bi-Horárias de Acesso às Redes da Mobilidade Elétrica, com o objetivo de simular uma operação em que foram feitos mais carregamentos do VE em horas fora de vazio (70%) e menos carregamentos em horas de vazio (30%).

Ainda a somar aos custos de aquisição dos VEs, foi considerado o custo das infraestruturas para alimentar os autocarros elétricos. O preço da estação de carregamento engloba o custo do sistema de fornecimento de energia, o custo do equipamento de carregamento e o custo do sistema de monitorização e comunicação [60]. O preço das infraestruturas de carregamento, foram disponibilizados pela Efacec [61, 62].

São adquiridas 14 infraestruturas de carregamento, uma vez que ambos os VEs carregam totalmente a sua bateria em 4h, e portanto, é possível carregar pelo menos dois VEs numa estação de carregamento, em horário de vazio.

Tabela 3.2: Custo da Infraestrutura de carregamento

	Infraestrutura de Carregamento		
Nível de Potência (kW)	40	90	150
Custo (uni.) (€)	16 000	22 000	28 000

As 14 infraestruturas adquiridas foram as QC90B, com um nível de potência de 90 kW, e um custo total de 308 000 €.

3.2.2 Custos de Ciclo de Vida

O sistema de armazenamento de energia dos VEs, a bateria, incluindo o seu sistema de gestão, em termos de durabilidade e custos, é o componente principal [63]. Normalmente, os fabricantes definem o desempenho da vida útil de uma bateria pela profundidade de descarga. Este parâmetro é frequentemente referido por *Depth of Discharge* (DoD) e refere-se à quantidade de carga retirada da bateria num ciclo típico de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta [64]. No entanto, uma vez que as condições operacionais podem variar muito em termos de carga e descarga de energia, os desempenhos definidos pelos fabricantes podem não corresponder às condições reais de operação. Portanto, estimativas sobre a durabilidade das baterias nos autocarros urbanos são difíceis de fazer [44].

Para este caso de estudo foi estimado que o ciclo de vida da bateria seria de 11 anos, e o preço de aquisição de um sistema de baterias seria de 408 €/kWh enquanto que o tempo de vida de um VCI seria de 15 anos [48, 57, 60, 65].

Foi assumido que os custos de manutenção aumentam com a idade e uso do veículo. Foram utilizadas taxas de manutenção por km para VCIs [66]. Com base em dados e previsões existentes, é suposto que os custos de manutenção dos VEs sejam 50% inferiores aos custos de manutenção dos VCIs tradicionais. Isto deve-se ao facto dos VEs serem mais fáceis de construir e, portanto, mais económicos em termos de manutenção, bem como o facto dos VEs não precisarem de mudanças de óleo e terem menos peças móveis [44, 57, 66].

Tabela 3.3: Custos de ciclo de vida

	VCI	VE 1	VE 2
Tempo de vida (anos)	15		11
Preço do Sistema de baterias (€/kWh)	-		408
Sistema de baterias (kWh)	-	311	345
Custo do Sistema de baterias (€)	-	126 888	140 760
Custo de manutenção (€/km)	$(0,124 + 0,0249 \times i)$	$(0,062 + 0,0125 \times i)$	

i = idade do veículo

3.3 Metodologia

Para analisar a viabilidade económica da substituição dos veículos da frota existente, três tipos de dados foram essenciais: fatores económicos, características do veículo de substituição e configuração inicial da frota. Os fatores económicos incluem o horizonte de planeamento, o número anual de veículos (procura) ou os kms anuais a serem percorridos, a taxa de atualização, o preço da energia e a previsão futura (combustível, eletricidade).

Os dados relativos às características dos VEs propostos para a substituição da frota, podem ser consultados nas tabelas 3.1 e 3.3. Relativamente à frota inicial sabe-se que existem 28 VCIs a operar nas 19 linhas TUG, com uma média de idades de 10,5 anos, em que o veículo mais recente tem 5 anos de idade e o mais antigo 16.

A metodologia utilizada neste caso de estudo, foi substituir os VCIs assim que estes ultrapassam os 15 anos de idade. Portanto, como é possível observar na tabela 3.4, no ano 0 são adquiridos 3 VEs, no ano 1 é adquirido 1 VE, e por aí em diante, até a frota ser totalmente substituída por VEs no ano 11.

Tabela 3.4: Idade dos veículos da frota inicial

Idade	Nº de Veículos
16	3
15	1
14	2
13	3
12	4
11	2
9	1
8	2
7	9
5	1

Os kms anuais percorridos foram obtidos através da unidades de medida de transporte Veículo-km, calculada pela multiplicação do número de horários diários nos dois sentidos de uma dada linha dos TUG, pela extensão total do percurso, medida em kms.



Figura 3.2: Linha 11 - Nespereira [67]

Como é possível observar na figura 3.2, o número de horários diários de 2ª a 6ª feira na linha 11 é de 40, enquanto que aos fins-de-semana e feriados é de 26 em ambos os sentidos. Multiplicando pela extensão da linha 11, teremos o número de kms diários que um autocarro percorre.

Tabela 3.5: Veículo-kms de 2ª a 6ª por linha

	Extensão		Nº de Horários		Veículo-kms
	Sentido (A-B)	Sentido (B-A)	Sentido (A-B)	Sentido (B-A)	
Linha Cidade	7,776 km	Circular	23	Circular	178,84 km
Linha 11	9,464 km	9,137 km	40	40	744,06 km
Linha 12	7,095 km	7,006 km	24	25	345,41 km
Linha 21	5,300 km	5,100 km	26	27	275,53 km
Linha 22	7,397 km	7,291 km	16	16	235,02 km
Linha 31	6,334 km	6,334 km	17	17	215,35 km
Linha 32	6,735 km	6,735 km	17	17	229,00 km
Linha 42	15,086 km	15,038 km	25	26	768,12 km
Linha 51	4,792 km	4,404 km	11	11	101,16 km
Linha 52	5,932 km	5,536 km	13	14	154,61 km
Linha 61	8,117 km	7,845 km	24	25	390,94 km
Linha 62	15,897 km	15,853 km	24	24	762,01 km
Linha 63	7,428 km	7,371 km	13	13	192,40 km
Linha 71	3,839 km	3,811 km	25	26	195,04 km
Linha 72	20,598 km	20,598 km	12	12	494,36 km
Linha 81	13,309 km	13,088 km	15	16	409,05 km
Linha 82	22,267 km	22,267 km	13	13	578,94 km
Linha 83	12,918 km	12,918 km	24	24	620,05 km
Linha 84	8,367 km	8,367 km	13	14	225,90 km
					Total
					7 115,77 km

Tabela 3.6: Veículo-kms de fins-de-Semana e feriados por linha

	Extensão		Nº de Horários		Veículo-kms
	Sentido (A-B)	Sentido (B-A)	Sentido (A-B)	Sentido (B-A)	
Linha Cidade	7,776 km	Circular	22	Circular	171,06 km
Linha 11	9,464 km	9,137 km	26	26	483,64 km
Linha 12	7,095 km	7,006 km	18	19	260,81 km
Linha 21	5,300 km	5,100 km	25	25	260,02 km
Linha 22	7,397 km	7,291 km	12	12	176,26 km
Linha 31	6,334 km	6,334 km	13	13	164,68 km
Linha 32	6,735 km	6,735 km	13	13	175,12 km
Linha 42	15,086 km	15,038 km	12	13	376,52 km
Linha 51	4,792 km	4,404 km	4	4	36,78 km
Linha 52	5,932 km	5,536 km	9	9	103,20 km
Linha 61	8,117 km	7,845 km	12	13	199,39 km
Linha 62	15,897 km	15,853 km	14	14	444,50 km
Linha 63	7,428 km	7,371 km	9	9	133,20 km
Linha 71	3,839 km	3,811 km	18	19	141,50 km
Linha 72	20,598 km	20,598 km	10	10	411,97 km
Linha 81	13,309 km	13,088 km	15	15	395,96 km
Linha 82	22,267 km	22,267 km	13	13	578,94 km
Linha 83	12,918 km	12,918 km	13	13	335,86 km
Linha 84	8,367 km	8,367 km	8	9	142,23 km
					Total
					4 991,66 km

Para efeitos do caso de estudo, é considerado que todos os anos do horizonte de planeamento têm 252 dias úteis, 100 fins-de-semana e 13 feriados.

Tabela 3.7: Veículo-kms anuais

	Dias úteis	Fins-de-semana	Feriados	Total
Veículo-kms (km)	1 793 174,21	499 165,60	64 891,53	2 357 231,35

Como referido no subcapítulo 3.2.1, com os dados disponíveis para a operação, foi assumido que estes kms são divididos igualmente pelos 28 autocarros da frota. Isto implica que um autocarro num ano percorra 84 186,83 km, que corresponde a uma média diária de 230,65 km. No entanto, sabe-se que nos dias úteis a operação é maior, pois são percorridos mais kms que aos fins-de-semana e feriados, devido ao maior número de horários. Dividiu-se então o número de Veículos-kms percorridos diariamente de 2^a a 6^a (7 115,77 km) pelos 28 autocarros, de forma a obter um número máximo de kms percorridos no ano. Isto traduz-se em 254,14 km percorridos diariamente de 2^a a 6^a.

Este valor foi obtido com o objetivo de aferir se os VEs propostos, com um carregamento, teriam autonomia suficiente de assegurar o número de kms diários percorridos em dias úteis nas linhas TUG. Ambos os VEs propostos têm autonomia para percorrer estes 254,14 kms diários com um carregamento, como se pode verificar na tabela 3.1. Caso isso não se verificasse, seria necessário adquirir mais VEs que os 28 VCIs existentes na frota, de forma a garantir a operacionalidade das linhas. Consegue-se assim, com os mesmos 28 VEs, garantir que as 19 linhas TUG sejam supridas, sem que seja necessário parar para carregar, que teria como consequência deixar de funcionar em determinados horários, e reduzir a mobilidade do município.

Após a obtenção do número de kms anuais percorridos, obteve-se os consumos dos diferentes autocarros a operar nas linhas TUG, multiplicando os Veículo-kms pelos consumos especificados na tabela 3.1:

Tabela 3.8: Consumos anuais

	VCI	VE 1	VE 2
Consumo	1 149 386,00 l	2 810 212,64 kWh	2 922 598,55 kWh
Consumo/Autocarro	41 049,50 l	100 364,74 kWh	104 378,52 kWh

Para avaliar o custo total da operação C_{Op} , são somados os custos de aquisição dos VEs C_{VE} , custos de aquisição das infraestruturas de carregamento C_{Carr} , custos do consumo de energia dos VEs C_{ConsVE} , os custos de manutenção dos VEs C_{ManVE} , o custo de aquisição das baterias C_{Bat} , bem como os custos do consumo de energia do VCIs $C_{ConsVCI}$ e os custos de manutenção dos VCIs C_{ManVCI} .

$$C_{Op} = C_{VE} + C_{Carr} + C_{ConsVE} + C_{ManVE} + C_{Bat} + C_{ConsVCI} + C_{ManVCI} \quad (3.1)$$

O custo do consumo de energia é obtido através da multiplicação dos consumos especificados na tabela 3.8 pelo preço da respetiva energia:

Tabela 3.9: Custos do consumo de energia

	VCI	VE 1	VE 2
Consumo/Autocarro	41 049,50 l	100 364,74 kWh	104 378,52 kWh
Preço da energia	1,455 €/l	0,1372 €/kWh	
Custo do consumo (€)	59 727,02	13 774,40	14 325,26

Na tabela 3.9 apresenta-se o custo do consumo de energia do ano 0. Foi assumida uma taxa de inflação anual sobre o preço do combustível de 3.5% e de 1.8% sobre o preço da eletricidade. Estes valores foram obtidos segundo previsões de [57, 66, 68].

No ano 11, todos os VCIs que pertenciam à frota foram substituídos por VEs, e no ano 12 são adquiridas baterias para serem substituídas nos primeiros três VEs adquiridos no ano 0. No entanto, apesar da compra das baterias, os custos de manutenção dos VEs continuam a ser referentes à idade do veículo. Portanto, os primeiros VEs adquiridos no ano 0 terão 12 anos de idade quando se procede à troca das baterias, e os custos de manutenção serão relativos aos 12 anos de idade.

Para avaliar a viabilidade económica do projeto de investimento, procedeu-se ao cálculo do Valor Atual Líquido (VAL) do custo total da operação, com uma taxa de atualização t de 6,47% para um horizonte temporal de 22 anos [69].

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{C_{Op_i}}{(1+t)^i} \quad (3.2)$$

O VAL é o valor presente de um projeto, calculado a partir de fluxos de caixa futuros. É principalmente uma avaliação de todos os fluxos de caixa envolvidos no projeto, tanto positivos quanto negativos. Ou seja, trata-se de estimar todo o dinheiro que se irá gastar e receber com o projeto.

Como as entradas e saídas de caixa ocorrem em diferentes momentos no tempo, não se pode simplesmente adicioná-las, porque o dinheiro terá valores diferentes em função do tempo, e a inflação tende a desvalorizar o dinheiro. Portanto, um euro vale mais hoje do que valerá daqui a cinco, dez ou vinte anos. A partir da atualização de todos os fluxos de caixa futuros para o momento presente, estes poderão então ser adicionados [70].

Neste caso em concreto, os fluxos de caixa são relativos ao custo total da operação C_{Op} , atualizando-se todos os custos futuros para o momento presente.

3.3.1 Outros Cenários

Outros dois cenários adicionais foram avaliados. Um cenário em que todos os VCIs da frota dos TUG foram substituídos por VEs no ano 0 (Cenário 2), e outro em que os VCIs da frota à medida que atingiam os 15 anos de idade foram substituídos por outros VCIs (Cenário 3).

Percebe-se que a substituição total da frota no ano 0 por VEs, implicaria um enorme investimento inicial. De qualquer forma, procedeu-se a esta avaliação económica com o objetivo de se fazer uma comparação do custo total da operação com o primeiro cenário, descrito no capítulo 3.3. Este é um cenário limite.

Para o Cenário 2, a equação 3.1 sofre alterações, uma vez que os VCIs com idade igual ou inferior a 10 anos são vendidos pelo seu valor de mercado no ano 0, $V_{MercadoVCI}$. Os VCIs da frota desvalorizam com uma taxa relativa à idade do veículo dada por [71].

Tabela 3.10: Valor de mercado dos VCIs

Idade	Nº de Veículos	Valor de mercado
16	3	0,00 €
15	1	0,00 €
14	2	0,00 €
13	3	0,00 €
12	4	0,00 €
11	2	0,00 €
9	1	27 280 €
8	2	70 400 €
7	9	388 080 €
5	1	64 240 €
Total		550 000 €

A equação 3.1, passa a ser então:

$$C_{Op} = C_{VE} + C_{Carr} + C_{ConsVE} + C_{ManVE} + C_{Bat} - V_{MercadoVCI} \quad (3.3)$$

A avaliação económica do Cenário 3, tem o mesmo objetivo do Cenário 2, comparar o custo total da operação desta solução com os dois cenários anteriores. A equação 3.1 também sofre alterações neste cenário, que passa a ser:

$$C_{Op} = C_{VCI} + C_{ConsVCI} + C_{ManVCI} \quad (3.4)$$

em que C_{VCI} representa o custo de aquisição dos VCIs.

3.3.2 Emissões CO₂

Em todos os cenários discutidos anteriormente, estudou-se o impacto ambiental, especificamente as emissões de CO₂. Para os autocarros diesel, usou-se o valor de CO₂ emitido por litro de diesel queimado [72, 73]. No caso dos autocarros elétricos, apesar de serem considerados veículos de zero emissões, considerou-se o valor de CO₂ emitido por kWh produzido em Portugal [74, 75, 76].

Tabela 3.11: Emissões de CO₂ por tipo de veículo

	VCI	VE 1	VE 2
Emissões CO₂	2,47 kg/l	0,469 kg/kWh	
Consumo	1 149 386,00 l	2 810 212,64 kWh	2 922 598,55 kWh
Consumo/Autocarro	41 049,50 l	100 364,74 kWh	104 378,52 kWh

3.4 Resultados e Discussão

Os resultados dos diferentes cenários do caso de estudo, mostram claramente que a eficiência energética do autocarro urbano pode ser consideravelmente melhorada pela eletrificação da frota. Esta melhoria depende fortemente do nível de penetração de VEs.

Os resultados da avaliação mostram que os autocarros urbanos elétricos têm o melhor potencial para reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂. Os custos de aquisição dos VEs e os sistemas de armazenamento de energia (baterias) são os fatores mais críticos para melhorar a relação custo-benefício dessas configurações de autocarros urbanos alternativos.

Tabela 3.12: VAL dos diferentes cenários

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3
	VE 1	VE 2	VE 1	VE 2	VCI
VAL (€)	29 149 187,98	29 413 318,60	24 418 866,52	24 803 353,97	40 902 422,85

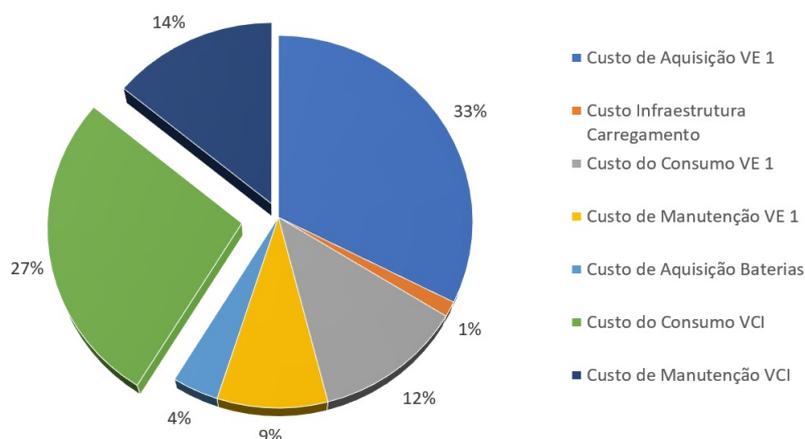


Figura 3.3: Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 1 VE 1

Através da figura 3.3, podemos perceber que 41% do custo total da operação, no horizonte de planeamento (22 anos), são relativos aos VCIs. O custo do consumo de energia (27%) e os custos de manutenção dos VCIs (14%) em 11 anos de operação, são mais significativos que o custo de aquisição dos 28 VEs. Percebe-se também que os VEs são energeticamente mais eficientes que os VCIs. O consumo de energia dos VCIs até a frota ser substituída totalmente por VEs (no ano 11) é cerca de duas vezes maior que o consumo de energia dos VEs em todo o horizonte de planeamento.

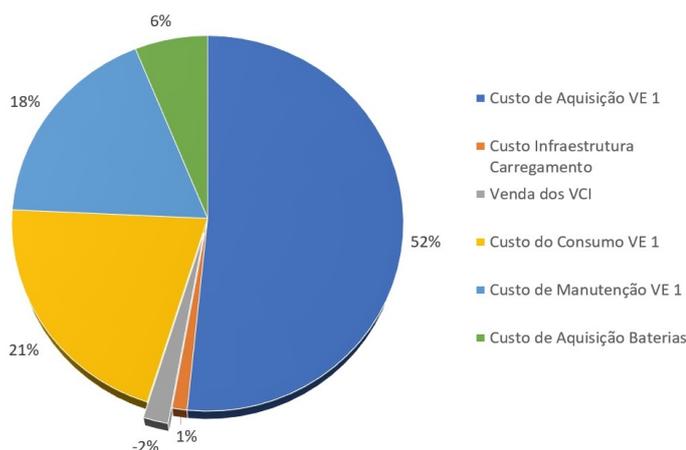


Figura 3.4: Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 2 VE 1

Pela figura 3.4, podemos observar que os custos mais significativos são os custos de aquisição dos VEs. Também é de notar que os custos de manutenção dos VEs, adquiridos todos no ano 0, são praticamente idênticos aos custos do consumo de energia.

Após observar-se as figuras 3.3 e 3.4, pode-se afirmar que a diferença dos VALs deve-se ao facto dos VCIs ainda estarem em operação, no Cenário 1. O facto de haver VCIs, até ao ano 11, reflete-se numa diferença de custo total de operação superior a 4,5 milhões de euros. Um valor significativo, que em teoria, daria para adquirir mais 9 VEs em possíveis situações de aumento da operação, ou até mesmo no caso de serem precisos mais que 28 autocarros elétricos para garantir a operacionalidade das 19 linhas TUG.

No entanto, como referido no subcapítulo 3.3.1, este cenário dificilmente será concretizável uma vez que o investimento inicial é muito grande, na ordem dos 14 milhões de euros.

No Cenário 3, os custos mais significativos são relativos ao consumo de energia dos VCIs. Após se proceder à análise das figuras 3.3 e 3.4, seria de se esperar que tal acontecesse, como se pode confirmar pela figura 3.5. A diferença dos VALs é notória, e traduz-se num aumento de custo total de operação de cerca de 29% relativamente ao Cenário 1 e de 40% ao Cenário 2.

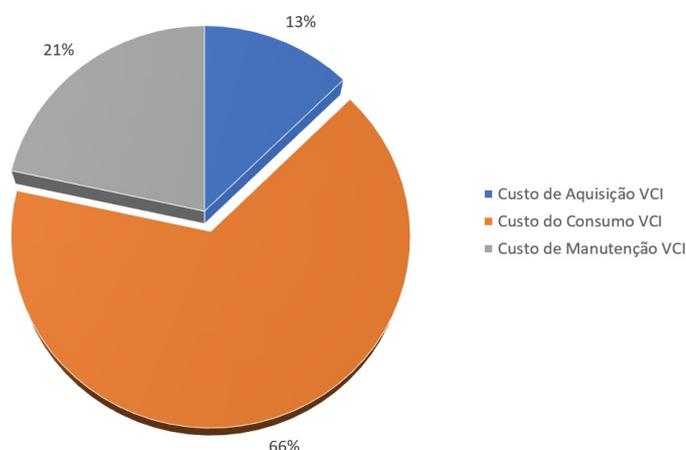


Figura 3.5: Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 3

Na figura 3.6 estão representadas as emissões de CO₂ em todo o horizonte de planeamento, em ktCO₂. No Cenário 1, devido à existência de VCIs em operação até ao ano 11, o valor das emissões é superior ao valor do Cenário 2. Comparativamente ao Cenário 3, o Cenário 1 apresenta uma redução de emissões na ordem dos 43% e o Cenário 2 de 57%. Valores muito significativos no cumprimento das metas impostas pela Comissão Europeia, que reproduzidos em outros municípios portugueses, teriam um papel relevante na redução das emissões de CO₂ em Portugal e na UE.

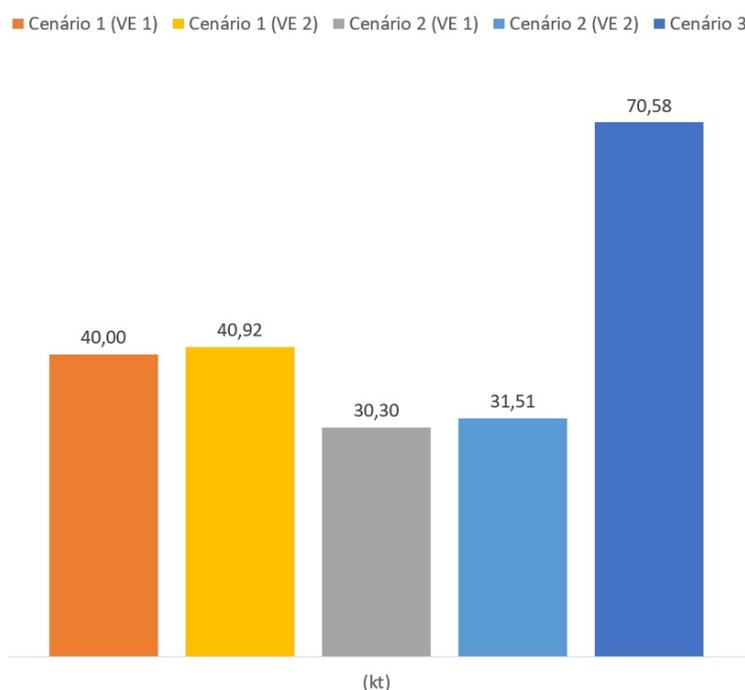


Figura 3.6: Emissões de CO₂ nos diferentes cenários, no horizonte temporal de 22 anos

Os valores discriminados do custo total de operação de todos os cenários propostos, podem ser consultados em anexo.

3.4.1 Período de Recuperação do Investimento

De forma a aferir o retorno do investimento em VEs, no Cenário 1 e 2, relativamente ao Cenário 3, analisaram-se os custos acumulados ao longo do horizonte temporal. Como é possível observar na tabela 3.12, tanto o Cenário 1 como o Cenário 2 têm custos inferiores relativamente ao Cenário 3.

No caso do Cenário 1, o retorno do investimento é obtido ao fim de 9 anos, enquanto que o retorno do Cenário 2 é obtido em menos de 6 anos. O custo total acumulado da operação do Cenário 1 apesar de ligeiramente superior, cresce de forma praticamente paralela ao Cenário 3, até que entre o ano 7 e o ano 9 os custos dos dois Cenários são idênticos, sendo que ao fim do ano 9 se obtém o retorno do investimento.

Quanto ao Cenário 2, a aquisição de todos os VEs no ano 0 tem uma implicação no custo total acumulado da operação, que se faz notar até o final do ano 3, sendo que a partir do ano 4 e até

próximo do ano 6 estes custos são praticamente idênticos ao custo total acumulado da operação do Cenário 3, momento em que se obtém o retorno do investimento.

Estas conclusões podem ser facilmente consultadas na figura 3.7.

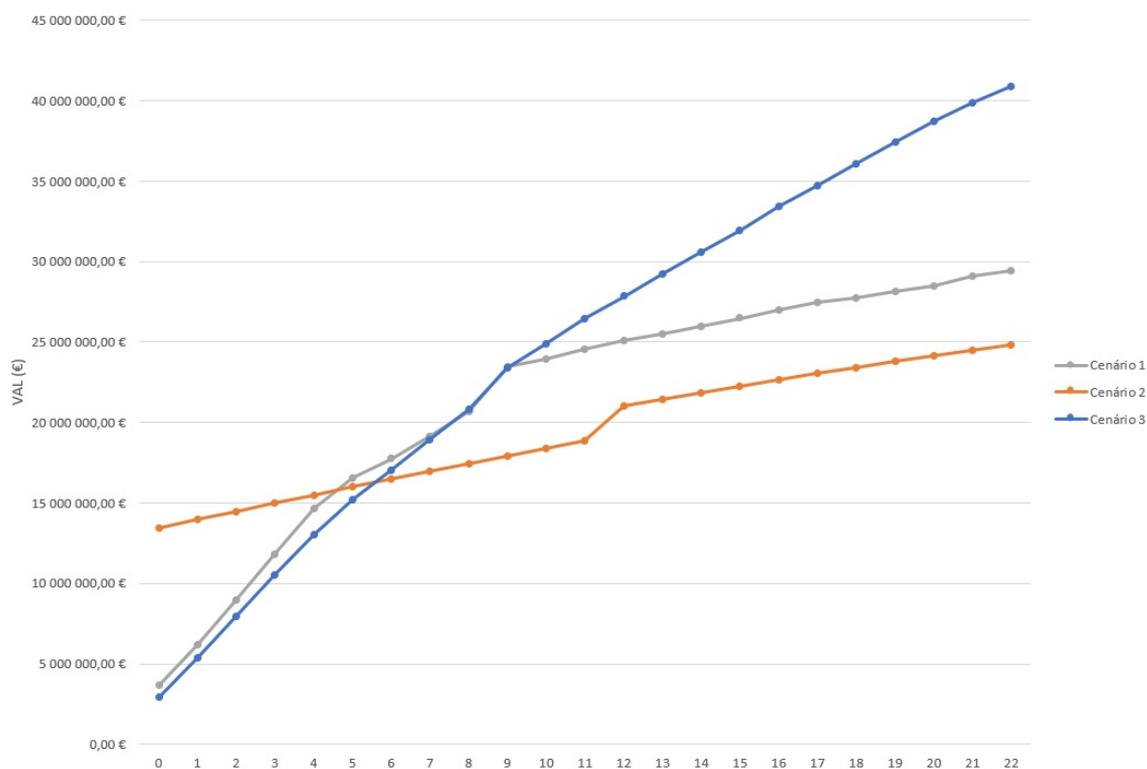


Figura 3.7: Custos totais acumulados dos diferentes Cenários no horizonte temporal de 22 anos

3.5 Balanço Energético

Apesar de não ser um tema abordado nesta dissertação, existe a noção de que uma frota de 28 autocarros elétricos terá impacto na rede [37].

De forma a que o impacto na rede seja minimizado, é proposto uma solução de balanço energético zero, através da construção de um parque fotovoltaico no município de Guimarães.

Os consumos anuais dos dois VEs propostos podem ser consultados na tabela 3.8. Para assegurar um balanço energético zero sobre estes consumos, será necessária uma potência fotovoltaica instalada de 2 MW no caso da frota ser operada pelo VE 1 e de 2,1 MW no caso da frota ser operada pelo VE 2. Estes dados foram obtidos através do software *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) [77].

Uma potência instalada de 2 MW em Guimarães, assegura uma produção de energia anual de 2 880 000 kWh [78], enquanto que uma potência instalada de 2,1 MW assegura uma produção de energia anual de 3 020 000 kWh [79], ambas suficientes para suprir as necessidades anuais de consumo de energia dos VEs a operar nas linhas TUG.

Serão necessários cerca de 6 667 módulos solares de 300 W de potência [80], com uma área de $1,67 m^2$, no caso do VE 1, e cerca de 7 000 no caso do VE 2. Contabilizando a distância entre as fileiras dos módulos, $2,15 m$, para assegurar que não ocorre o efeito de sombreamento, serão necessários 3,5 ha e 3,68 ha, respetivamente, para construir o parque fotovoltaico.

Segundo [81], um parque solar com uma potência instalada de 5 MW terá um custo de 1,19 €/W para um parque solar constituído por painéis solares de inclinação fixa, e de 1,28 €/W no caso do parque ser constituído por seguidores solares de um eixo.



Figura 3.8: Custo total do PV, discriminado por tipo de custo [81]

Como é possível observar na figura 3.8, os custos não são lineares à medida que potência instalada aumenta, e para uma potência inferior a 5 MW é de esperar que o €/W seja superior. No entanto, foi assumido que um parque solar com uma potência instalada de 2 MW terá um custo de 1,30 €/W para um parque solar constituído por painéis solares de inclinação fixa, e de 1,39 €/W no caso do parque ser constituído por seguidores solares de um eixo.

Tabela 3.13: Custo dos parques solares

Potência Instalada (MW)	Inclinação Fixa		Seguidores Solares de um eixo	
	Custo (€)	2 600 000	2 730 000	2 780 000

Como referido anteriormente, o objetivo da construção do parque fotovoltaico não é a redução dos custos totais de operação C_{Op} (dos cenários 1 e 2) através da injeção de energia na rede. O objetivo é assegurar um balanço energético zero sobre os consumos dos VEs, de forma a minimizar o impacto destes 28 autocarros na rede.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalho Futuro

O capítulo seguinte será focado nas principais conclusões do trabalho desenvolvido nesta dissertação. Além disso, algumas diretrizes para continuar e melhorar este trabalho serão apresentadas.

4.1 Satisfação dos Objetivos

De uma forma geral, os VEs ainda são vistos com alguma desconfiança, muito por causa da incerteza da duração das baterias numa viagem de longo curso e a incerteza de não existirem estações de carregamento suficientes nas estradas. Essa desconfiança é normal, uma vez que os VEs são uma tecnologia relativamente recente, e adotar esta nova tecnologia implica a mudança de hábitos enraizados na sociedade há muitos anos.

No entanto, quando se refere a autocarros elétricos em vez de carros particulares elétricos, todas estas desconfianças não devem ter um impacto tão grande. Os autocarros possuem rotas fixas, horários de operação fixos e paragens fixas. Isto significa que da mesma forma que as rotas podem ser programadas para uma operação diária, o mesmo pode ser feito com a energia das baterias. As linhas de autocarros podem ser planeadas para uma operação diária de tal forma que a energia contida nas baterias seja usada de maneira ideal, e quando e durante quanto tempo estas devem ser carregadas.

Esta foi a premissa usada nesta dissertação, e portanto, foi sempre assumido que os autocarros elétricos propostos teriam autonomia suficiente para cumprir o número de kms diários exigidos pela operação, sem ter que parar para carregar.

Ao longo da análise do caso de estudo, percebe-se que o custo de aquisição dos autocarros elétricos são - com uma larga margem - os principais custos a ter em conta aquando da avaliação económica da substituição da frota. O custo dos sistemas das baterias, para se efetuar a troca ao fim dos 11 anos (Cenário 1), mostrou-se não ter um impacto tão grande quanto o que se esperaria no custo total da operação.

Ainda relativamente ao Cenário 1, percebe-se que o facto de existirem VCIs em operação, tem uma implicação nos custos maior que a aquisição dos 28 VEs. Isto revela que a curto/médio prazo,

a substituição das frotas de VCIs por VEs que servem os municípios portugueses, deve ser uma realidade a ter em conta, tanto a nível de custos como a nível da redução das emissões CO₂.

Quanto ao Cenário 2, conclui-se que em termos de custo total da operação seria mais vantajoso, mas que dificilmente acontecerá, devido ao forte investimento inicial que teria que ser feito, incompatível com a realidade da maioria dos municípios portugueses.

Numa avaliação geral, espera-se que esta não seja uma realidade distante, porque além da redução dos custos, também é uma solução que reduzirá as emissões de CO₂, e que por consequência terá uma contribuição maior para Portugal atingir as metas impostas pela UE, e mitigar as emissões de GEEs mundiais.

4.2 Trabalho Futuro

Os resultados do trabalho desenvolvido nesta dissertação podem inspirar outros estudos de pesquisa tais como, aferir a nível operacional a viabilidade desta solução. Tendo dados reais da operação, é sugerido o estudo da gestão da frota ao nível de tempos de paragem para carregar o autocarro elétrico, no caso de ser necessário.

Outra possibilidade é estudar a localização ótima para introduzir pontos de carregamentos nas paragens das diferentes linhas dos TUG, como abordado no subcapítulo 2.2.5.

Relativamente ao subcapítulo 3.5, será interessante perceber o impacto na rede de uma frota de autocarros elétricos, bem como aferir a viabilidade do abastecimento dos VEs ser assegurado por um parque solar de forma a reduzir os custos operacionais, através da venda de energia à rede.

Anexo A

Custos Totais de Operação

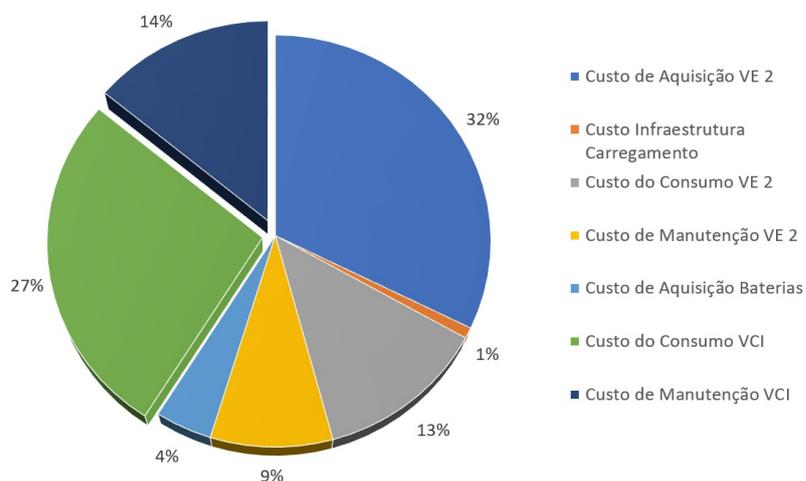


Figura A.1: Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 1 VE 2

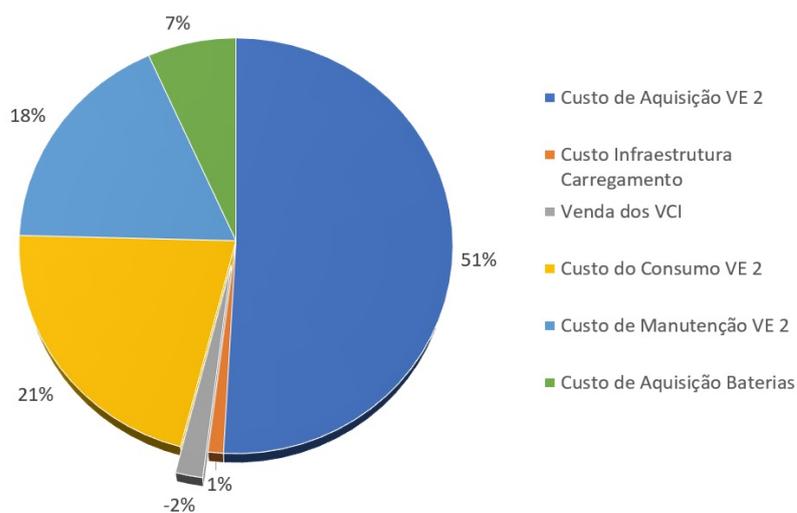


Figura A.2: Percentagens do custo total de operação C_{Op} , Cenário 2 VE 2

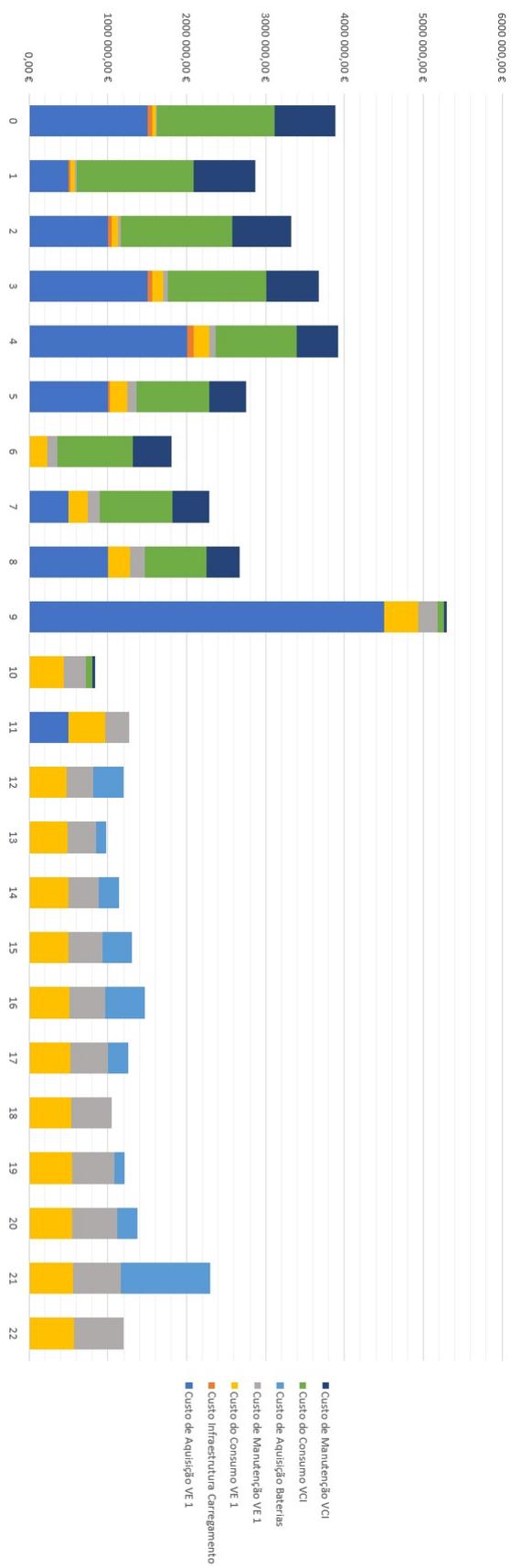


Figura A.3: Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 1 VE 1)

Tabela A.1: Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 1 VE 1)

Ano	Nº de VCIs	Nº de VEs	C _{VE} (€)	C _{Carr} (€)	C _{ConsVE} (€)	C _{ManVE} (€)	C _{Bat} (€)	C _{ConsVCI} (€)	C _{ManVCI} (€)	C _{Op} (€)
0	25	3	1 500 000	66 000	41 323,19	15 693,38	0,00	1 493 175,57	774 205,78	3 890 397,92
1	24	4	500 000	22 000	56 089,35	24 063,17	0,00	1 483 619,24	782 575,55	2 868 347,32
2	22	6	1 000 000	44 000	85 648,43	38 710,32	0,00	1 407 583,76	744 911,47	3 320 853,98
3	19	9	1 500 000	66 000	130 785,16	60 681,04	0,00	1 258 187,94	659 121,10	3 674 775,23
4	15	13	2 000 000	88 000	192 312,31	91 021,55	0,00	1 028 071,98	523 111,98	3 922 517,83
5	13	15	1 000 000	22 000	225 893,00	115 084,71	0,00	922 180,57	466 615,88	2 751 774,16
6	13	15	0,00	0,00	229 959,07	130 778,06	0,00	954 456,89	493 817,69	1 809 011,71
7	12	16	500 000	0,00	249 704,89	151 702,54	0,00	911 873,43	477 078,10	2 290 358,95
8	10	18	1 000 000	0,00	285 974,53	178 904,36	0,00	786 490,83	414 304,66	2 665 674,38
9	1	27	4 500 000	0,00	436 683,10	244 816,52	0,00	81 401,80	39 756,51	5 302 657,93
10	1	27	0,00	0,00	444 543,40	273 064,55	0,00	84 250,86	41 848,96	843 707,77
11	0	28	500 000	0,00	469 306,11	306 543,71	0,00	0,00	0,00	1 275 849,82
12	0	28	0,00	0,00	477 753,62	335 837,97	380 664	0,00	0,00	1 194 255,59
13	0	28	0,00	0,00	486 353,19	365 132,22	126 888	0,00	0,00	978 373,41
14	0	28	0,00	0,00	495 107,54	394 426,48	253 776	0,00	0,00	1 143 310,02
15	0	28	0,00	0,00	504 019,48	423 720,74	380 664	0,00	0,00	1 308 404,21
16	0	28	0,00	0,00	513 091,83	453 014,99	507 552	0,00	0,00	1 473 658,82
17	0	28	0,00	0,00	522 327,48	482 309,25	253 776	0,00	0,00	1 258 412,73
18	0	28	0,00	0,00	531 729,38	511 603,51	0,00	0,00	0,00	1 043 332,88
19	0	28	0,00	0,00	541 300,51	540 897,76	126 888	0,00	0,00	1 209 086,27
20	0	28	0,00	0,00	551 043,91	570 192,02	253 776	0,00	0,00	1 375 011,93
21	0	28	0,00	0,00	560 962,71	599 486,28	1 141 992	0,00	0,00	2 302 440,98
22	0	28	0,00	0,00	571 060,03	628 780,53	0,00	0,00	0,00	1 199 840,57

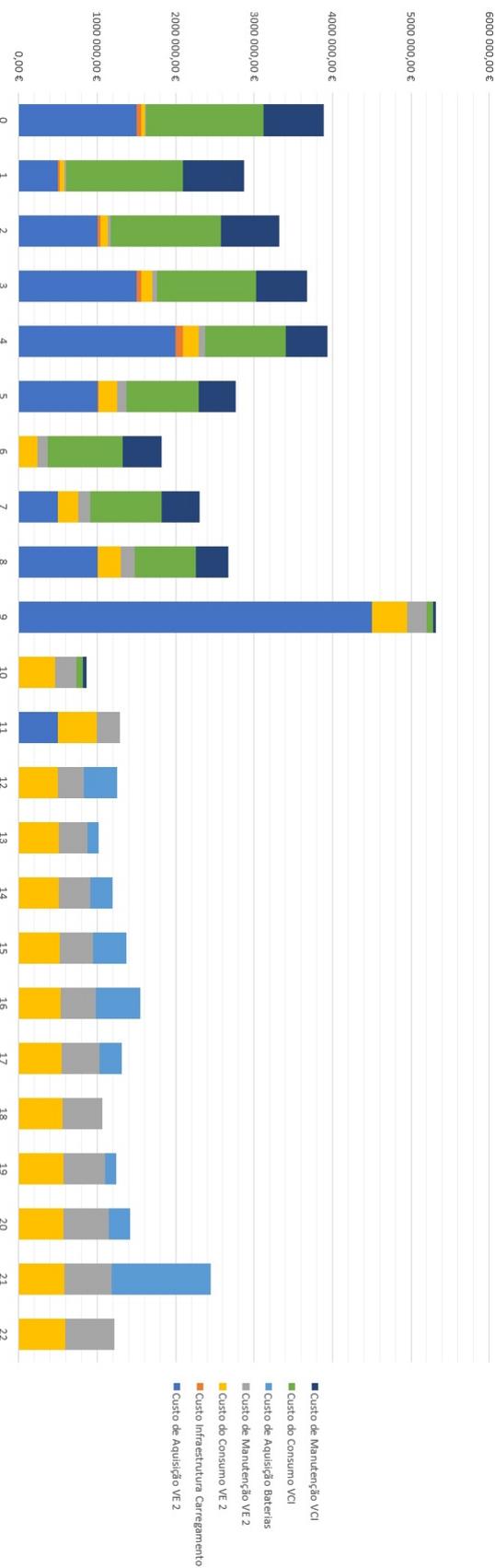


Figura A.4: Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 1 VE 2)

Tabela A.2: Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 1 VE 2)

Ano	Nº de VCIs	Nº de VEs	C_{VE} (€)	C_{Carr} (€)	C_{ConsvE} (€)	C_{ManvE} (€)	C_{Bat} (€)	$C_{ConsvCl}$ (€)	C_{ManvCl} (€)	C_{Op} (€)
0	25	3	1 500 000	66 000	42 975,79	15 693,38	0,00	1 493 175,57	774 205,78	3 892 050,51
1	24	4	500 000	22 000	58 332,47	24 063,17	0,00	1 483 619,24	782 575,55	2 870 590,44
2	22	6	1 000 000	44 000	89 073,68	38 710,32	0,00	1 407 583,76	744 911,47	3 324 279,23
3	19	9	1 500 000	66 000	136 015,51	60 681,04	0,00	1 258 187,94	659 121,10	3 680 005,58
4	15	13	2 000 000	88 000	200 003,26	91 021,55	0,00	1 028 071,98	523 111,98	3 930 208,77
5	13	15	1 000 000	22 000	234 926,90	115 084,71	0,00	922 180,57	466 615,88	2 760 808,06
6	13	15	0,00	0,00	239 155,59	130 778,06	0,00	954 456,89	493 817,69	1 818 208,23
7	12	16	500 000	0,00	259 691,08	151 702,54	0,00	911 873,43	477 078,10	2 300 345,14
8	10	18	1 000 000	0,00	297 411,21	178 904,36	0,00	786 490,83	414 304,66	2 677 111,06
9	1	27	4 500 000	0,00	454 146,91	244 816,52	0,00	81 401,80	39 756,51	5 320 121,74
10	1	27	0,00	0,00	462 321,56	273 064,55	0,00	84 250,86	41 848,96	861 485,93
11	0	28	500 000	0,00	488 074,58	306 543,71	0,00	0,00	0,00	1 294 618,29
12	0	28	0,00	0,00	496 859,92	335 837,97	422 280,00	0,00	0,00	1 254 977,89
13	0	28	0,00	0,00	505 803,40	365 132,22	140 760,00	0,00	0,00	1 011 695,63
14	0	28	0,00	0,00	514 907,86	394 426,48	281 520,00	0,00	0,00	1 190 854,34
15	0	28	0,00	0,00	524 176,21	423 720,74	422 280	0,00	0,00	1 370 176,94
16	0	28	0,00	0,00	533 611,38	453 014,99	563 040	0,00	0,00	1 549 666,37
17	0	28	0,00	0,00	543 216,38	482 309,25	281 520	0,00	0,00	1 307 045,63
18	0	28	0,00	0,00	552 994,28	511 603,51	0,00	0,00	0,00	1 064 597,78
19	0	28	0,00	0,00	562 948,17	540 897,76	140 760	0,00	0,00	1 244 605,94
20	0	28	0,00	0,00	573 081,24	570 192,02	281 520	0,00	0,00	1 424 793,26
21	0	28	0,00	0,00	583 396,70	599 486,28	1 266 840	0,00	0,00	2 449 722,98
22	0	28	0,00	0,00	593 897,84	628 780,53	0,00	0,00	0,00	1 222 678,38

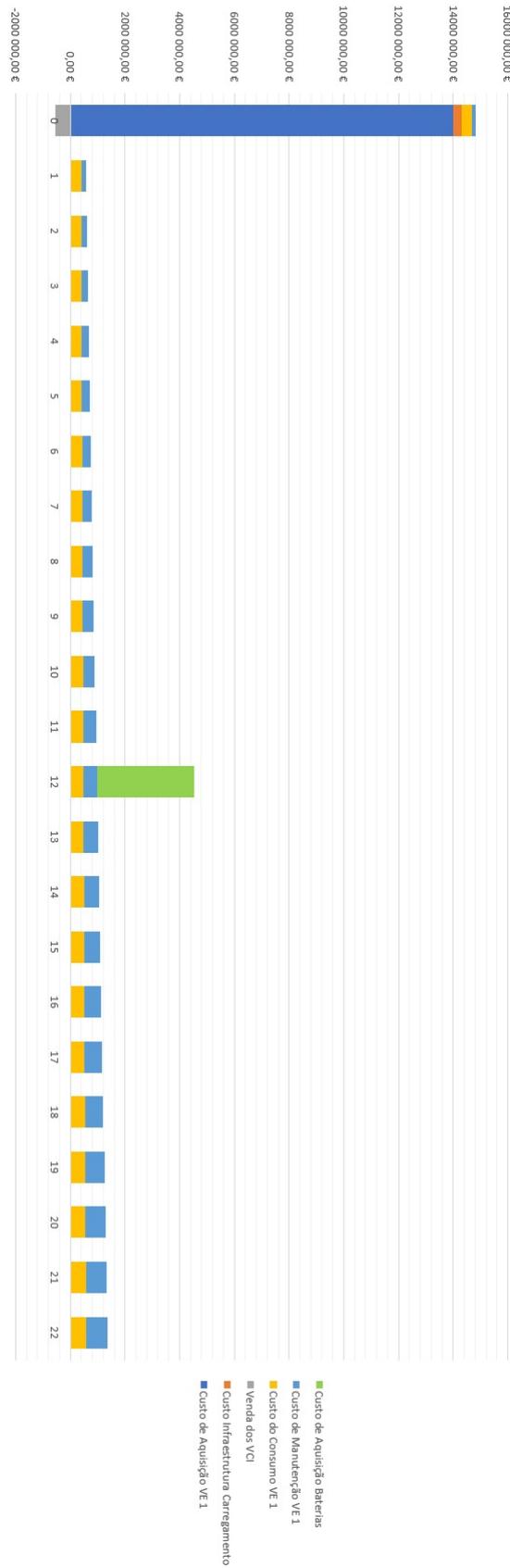


Figura A.5: Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 2 VE 1)

Tabela A.3: Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 2 VE 1)

Ano	Nº de VCIs	Nº de VEs	C_{VE} (€)	C_{Carr} (€)	$V_{MercadoVCI}$ (€)	C_{ConsVE} (€)	C_{MantVE} (€)	C_{Bat} (€)	C_{Op} (€)
0	0	28	14 000 000	308 000	-550 000	385 683,14	146 471,52	0,00	14 290 154,66
1	0	28	0,00	0,00	0,00	392 625,43	175 765,78	0,00	568 391,21
2	0	28	0,00	0,00	0,00	399 692,69	205 060,03	0,00	604 752,72
3	0	28	0,00	0,00	0,00	406 887,16	234 354,29	0,00	641 241,45
4	0	28	0,00	0,00	0,00	414 211,13	263 648,55	0,00	677 859,68
5	0	28	0,00	0,00	0,00	421 666,93	292 942,80	0,00	714 609,73
6	0	28	0,00	0,00	0,00	429 256,93	322 237,06	0,00	751 493,99
7	0	28	0,00	0,00	0,00	436 983,56	351 531,32	0,00	788 514,88
8	0	28	0,00	0,00	0,00	444 849,26	380 825,57	0,00	825 674,84
9	0	28	0,00	0,00	0,00	452 856,55	410 119,83	0,00	862 976,38
10	0	28	0,00	0,00	0,00	461 007,97	439 414,09	0,00	900 422,05
11	0	28	0,00	0,00	0,00	469 306,11	468 708,34	0,00	938 014,46
12	0	28	0,00	0,00	0,00	477 753,62	498 002,60	3 552 864	4 528 620,22
13	0	28	0,00	0,00	0,00	486 353,19	527 296,86	0,00	1 013 650,04
14	0	28	0,00	0,00	0,00	495 107,54	556 591,12	0,00	1 051 698,66
15	0	28	0,00	0,00	0,00	504 019,48	585 885,37	0,00	1 089 904,85
16	0	28	0,00	0,00	0,00	513 091,83	615 179,63	0,00	1 128 271,46
17	0	28	0,00	0,00	0,00	522 327,48	644 473,89	0,00	1 166 801,37
18	0	28	0,00	0,00	0,00	531 729,38	673 768,14	0,00	1 205 497,52
19	0	28	0,00	0,00	0,00	541 300,51	703 062,40	0,00	1 244 362,90
20	0	28	0,00	0,00	0,00	551 043,91	732 356,66	0,00	1 283 400,57
21	0	28	0,00	0,00	0,00	560 962,71	761 650,91	0,00	1 322 613,62
22	0	28	0,00	0,00	0,00	571 060,03	790 945,17	0,00	1 362 005,20

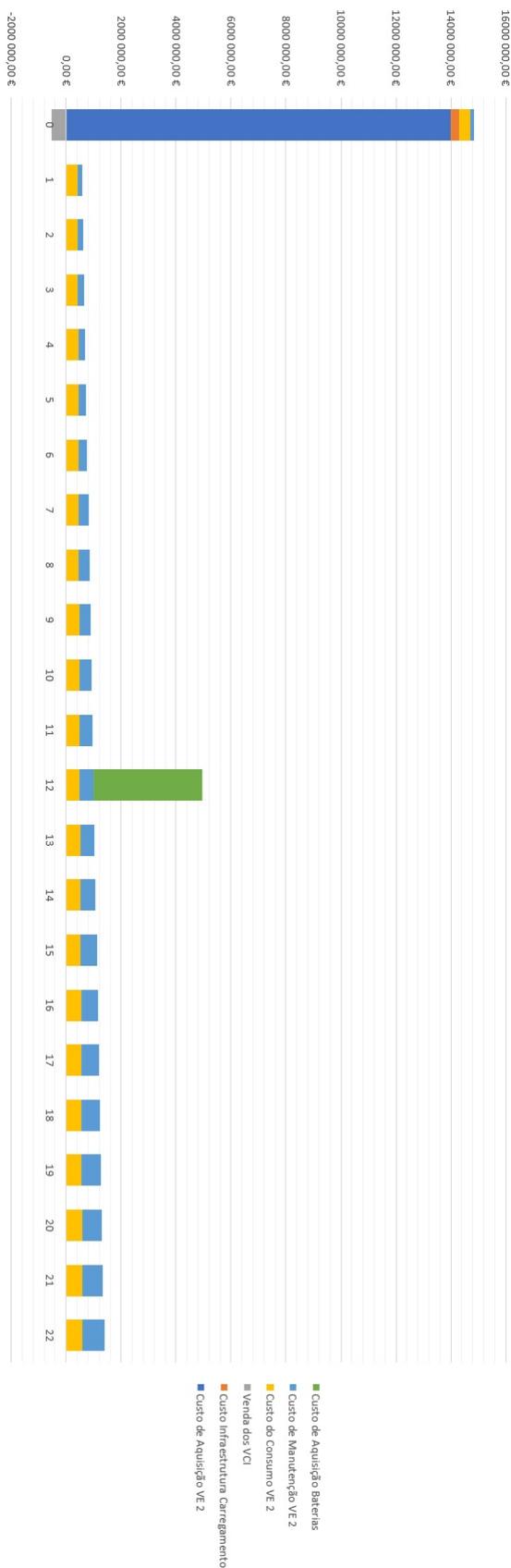


Figura A.6: Custos de operação total, C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 2 VE 2)

Tabela A.4: Custo da operação por penetração de VEs (Cenário 2 VE 2)

Ano	Nº de VCIs	Nº de VEs	C_{VE} (€)	C_{Carr} (€)	$V_{MercadoVCI}$ (€)	C_{ConsVE} (€)	C_{ManVE} (€)	C_{Bat} (€)	C_{Op} (€)
0	0	28	14 000 000	308 000	-550 000	401 107,36	146 471,52	0,00	14 305 578,88
1	0	28	0,00	0,00	0,00	408 327,29	175 765,78	0,00	584 093,07
2	0	28	0,00	0,00	0,00	415 677,19	205 060,03	0,00	620 737,22
3	0	28	0,00	0,00	0,00	423 159,38	234 354,29	0,00	657 513,67
4	0	28	0,00	0,00	0,00	430 776,24	263 648,55	0,00	694 424,79
5	0	28	0,00	0,00	0,00	438 530,22	292 942,80	0,00	731 473,02
6	0	28	0,00	0,00	0,00	446 423,76	322 237,06	0,00	768 660,82
7	0	28	0,00	0,00	0,00	454 459,39	351 531,32	0,00	805 990,71
8	0	28	0,00	0,00	0,00	462 639,66	380 825,57	0,00	843 465,23
9	0	28	0,00	0,00	0,00	470 967,17	410 119,83	0,00	881 087,00
10	0	28	0,00	0,00	0,00	479 444,58	439 414,09	0,00	918 858,67
11	0	28	0,00	0,00	0,00	488 074,58	468 708,34	0,00	956 782,93
12	0	28	0,00	0,00	0,00	496 859,92	498 002,60	3 941 280	4 936 142,53
13	0	28	0,00	0,00	0,00	505 803,40	527 296,86	0,00	1 033 100,26
14	0	28	0,00	0,00	0,00	514 907,86	556 591,12	0,00	1 071 498,98
15	0	28	0,00	0,00	0,00	524 176,21	585 885,37	0,00	1 110 061,58
16	0	28	0,00	0,00	0,00	533 611,38	615 179,63	0,00	1 148 791,01
17	0	28	0,00	0,00	0,00	543 216,38	644 473,89	0,00	1 187 690,27
18	0	28	0,00	0,00	0,00	552 994,28	673 768,14	0,00	1 226 762,42
19	0	28	0,00	0,00	0,00	562 948,17	703 062,40	0,00	1 266 010,57
20	0	28	0,00	0,00	0,00	573 081,24	732 356,66	0,00	1 305 437,90
21	0	28	0,00	0,00	0,00	583 396,70	761 650,91	0,00	1 345 047,62
22	0	28	0,00	0,00	0,00	593 897,84	790 945,17	0,00	1 384 843,01

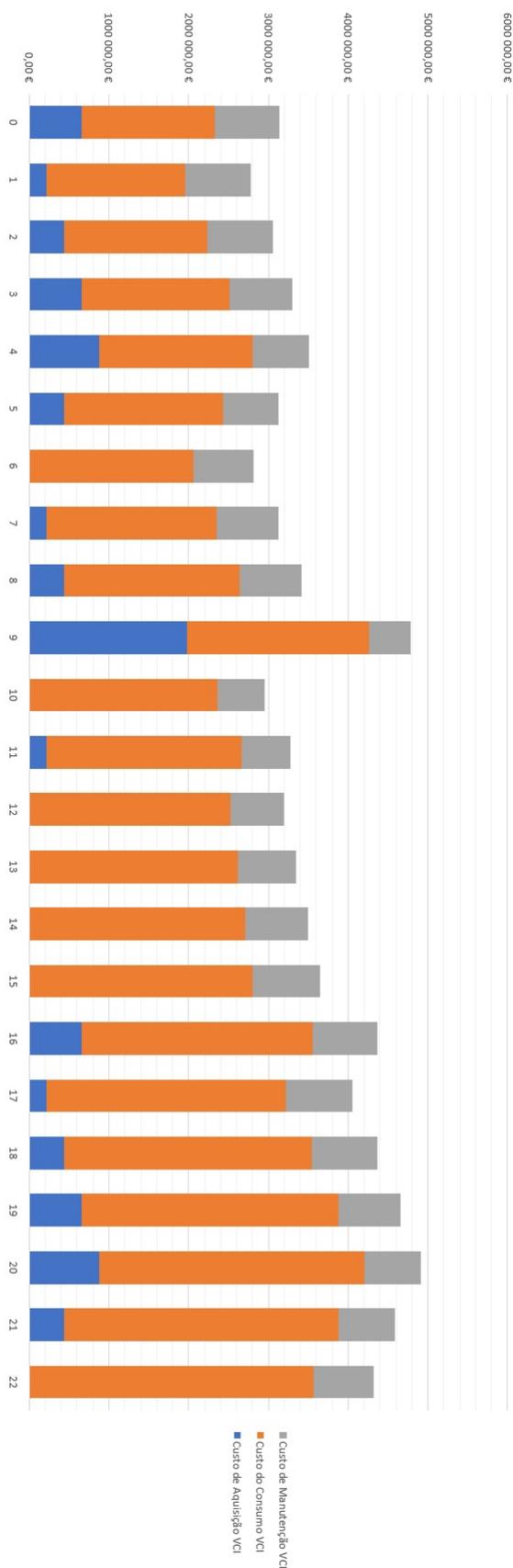


Figura A.7: Custos de operação total C_{Op} , discriminado por tipo de custo ao longo do horizonte de planeamento (Cenário 3)

Tabela A.5: Custos discriminados da operação do Cenário 3

Ano	Nº de VCIs	Nº de VEs	C_{VCI} (€)	$C_{Cons_{VCI}}$ (€)	$C_{Man_{VCI}}$ (€)	C_{Op} (€)
0	28	0	660 000	1 672 356,64	805 592,53	3 137 949,17
1	28	0	220 000	1 730 889,12	830 701,90	2 781 591,02
2	28	0	440 000	1 791 470,24	822 332,11	3 053 802,35
3	28	0	660 000	1 854 171,70	780 483,17	3 294 654,87
4	28	0	880 000	1 919 067,70	705 155,08	3 504 222,79
5	28	0	440 000	1 986 235,07	696 785,29	3 123 020,37
6	28	0	0,00	2 055 753,30	755 373,81	2 811 127,11
7	28	0	220 000	2 127 704,67	780 483,17	3 128 187,84
8	28	0	440 000	2 202 174,33	772 113,38	3 414 287,71
9	28	0	1 980 000	2 279 250,43	529 389,54	4 788 639,97
10	28	0	0,00	2 359 024,20	587 978,05	2 947 002,25
11	28	0	220 000	2 441 590,04	613 087,42	3 274 677,46
12	28	0	0,00	2 527 045,70	671 675,93	3 198 721,63
13	28	0	0,00	2 615 492,30	730 264,45	3 345 756,74
14	28	0	0,00	2 707 034,53	788 852,96	3 495 887,48
15	28	0	0,00	2 801 780,73	847 441,47	3 649 222,21
16	28	0	660 000	2 899 843,06	805 592,53	4 365 435,59
17	28	0	220 000	3 001 337,57	830 701,90	4 052 039,46
18	28	0	440 000	3 106 384,38	822 332,11	4 368 716,49
19	28	0	660 000	3 215 107,84	780 483,17	4 655 591,01
20	28	0	880 000	3 327 636,61	705 155,08	4 912 791,69
21	28	0	440 000	3 444 103,89	696 785,29	4 580 889,19
22	28	0	0,00	3 564 647,53	755 373,81	4 320 021,34

Referências

- [1] World Meteorological Organization (WMO). WMO statement on the state of the global climate in 2016, 2017. URL: https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414 [último acesso em 20/04/2018].
- [2] IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, 2014. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> [último acesso em 14/04/2018], doi:10.1017/CBO9781107415416.
- [3] Thomas R. Anderson, Ed. Hawkins, e Philip D. Jones. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3):178–187, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>.
- [4] International Energy Agency (IEA). CO₂ Emissions from Fuel Combustion: Overview. *IEA Statistics*, 2017. URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustion2017Overview.pdf> [último acesso em 15/05/2018].
- [5] International Energy Agency (IEA). CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2017 - Highlights. *IEA Publications*, 1:1–162, 2017. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf> [último acesso em 15/05/2018].
- [6] World Energy Council. World Energy Resources 2016. *World Energy Resources 2016*, páginas 1–33, 2016. URL: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> [último acesso em 20/04/2018].
- [7] James P. Dorian, Herman T. Franssen, e Dale R. Simbeck. Global challenges in energy. *Energy Policy*, 34(15):1984–1991, 2006. doi:10.1016/j.enpol.2005.03.010.
- [8] Eurostat. Greenhouse Gas Emission Statistics - Emission Inventories - Statistics Explained, 2016. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1180.pdf> [último acesso em 2018-03-13].
- [9] Seyma Akkaya Deviren e Bayram Deviren. The relationship between carbon dioxide emission and economic growth: Hierarchical structure methods. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 451(451):429–439, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.01.085>.

- [10] BP. BP Energy Outlook Energy 2017. *BP Statistical Review of World Energy*, 2017. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf> [último acesso em 20/04/2018].
- [11] International Energy Agency (IEA). Transport Energy and CO₂ : Moving towards Sustainability - Books - OECD iLibrary. Relatório técnico, IEA, 2009. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf> [último acesso em 15/05/2018].
- [12] European Commission. Trade - EUROPA. URL: https://europa.eu/european-union/topics/trade_en [último acesso em 2018-03-15].
- [13] Directorate-General for Mobility and Transport. EU Transport in figures. Statistical Pocketbook 2017. Relatório técnico, European Commission, 2017. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/pocketbook2017.pdf> [último acesso em 20/04/2018], doi:10.2832/041248.
- [14] European Commission. The European Union explained: Climate Action, 2014. URL: <http://europa.rs/images/publikacije/climate-action.pdf> [último acesso em 15/03/2018].
- [15] United Nations. Kyoto Protocol To the United Nations Framework Kyoto Protocol To the United Nations Framework. *Review of European Community and International Environmental Law*, 7:214–217, 1998. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> [último acesso em 15/03/2018].
- [16] Alexander Carius e R. Andreas Kraemer. *The Kyoto Protocol International Climate Policy for the 21st Century*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. doi:10.1007/978-3-662-03925-0.
- [17] Clean Energy Ministerial. About the Clean Energy Ministerial. URL: <http://www.cleanenergyministerial.org/about-clean-energy-ministerial> [último acesso em 2018-03-21].
- [18] Steinar Andresen, Jon Birger Skjærseth, Torbjørg Jevnaker, e Jørgen Wettestad. The Paris Agreement: Consequences for the EU and Carbon Markets? *Politics and Governance*, 4(3):188, 2016. doi:10.17645/pag.v4i3.652.
- [19] United Nations | Framework Convention on Climate Change (FCCC). Adoption of the Paris Agreement, 2015. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> [último acesso em 21/03/2018].
- [20] European Commission. Mission Innovation Challenges: Progress and Highlights, 2017. URL: <http://mission-innovation.net/wp-content/uploads/2017/06/Innovation-Challenges-Progress-and-Highlights.pdf> [último acesso em 21/03/2018].
- [21] European Commission. Strategic Energy Technology Plan, 2017. URL: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan> [último acesso em 22/03/2018].

- [22] European Commission. Clean energy for all Europeans, 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52016DC0860> [último acesso em 21/05/2018].
- [23] Rebecca Matulka. The History of the Electric Car, 2014. URL: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> [último acesso em 2018-05-23].
- [24] Massimo Guarnieri. Looking back to electric cars. *Proc. 3rd IEEE Hist. Electro-Technol. Conf. (HISTELCON)*, páginas 1–6, 2012. doi:10.1109/HISTELCON.2012.6487583.
- [25] Ian Mcneil e Lance Day. *Biographical Dictionary of the History of Technology*. Routledge, 1ª edição, 1996.
- [26] Amela Ajanovic. The future of electric vehicles: Prospects and impediments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(6):521–536, 2015. doi:10.1002/wene.160.
- [27] Nissan Motor Corporation. 70 years of electric thinking. URL: <https://www.nissan-global.com/EN/ZEROEMISSION/STORYBOARD/EV/> [último acesso em 2018-05-25].
- [28] Renault Portugal. Novo Renault ZOE. URL: <https://www.renault.pt/gama/veiculos-eletricos/zoe/novo-zoe/> [último acesso em 2018-06-12].
- [29] BMW. Born Electric. Visão Geral dos modelos BMW i. URL: <https://www.bmw.pt/pt/all-models/bmw-i.html> [último acesso em 2018-06-12].
- [30] Tesla. Carros elétricos, painéis solares e armazenamento de energia limpa. URL: https://www.tesla.com/pt_PT/ [último acesso em 2018-06-12].
- [31] CEM. Electric Vehicles Initiative, 2016. URL: <http://www.cleanenergyministerial.org/initiative-clean-energy-ministerial/electric-vehicles-initiative> [último acesso em 12/06/2018].
- [32] International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2017: Two million and counting. *IEA Publications*, páginas 1–71, 2017. URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf> [último acesso em 15/05/2018], doi:10.1787/9789264278882-en.
- [33] Green eMotion. Green eMotion Project. URL: <http://www.greenemotion-project.eu/about-us/index.php> [último acesso em 2018-06-12].
- [34] European Commission. Green eMotion Project Results, 2015. URL: <http://www.greenemotion-project.eu/upload/pdf/deliverables/Project-Results-online.pdf> [último acesso em 12/05/2018].
- [35] ZeEUS. ZeEUS – Zero Emission Urban Bus System, 2014. URL: <http://zeeus.eu/> [último acesso em 2018-06-14].
- [36] The International Association of Public Transport UITP. ZeEUS eBus Report #2, 2018. URL: <http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-2.pdf> [último acesso em 03/06/2018].
- [37] International Energy Agency. Global EV Outlook 2018. *Global EV Outlook*, páginas 9–10, 2018. doi:EIA-0383(2016).

- [38] Ankai. Enterprise introduction. URL: <http://english.ankai.com/Enterntroduction/> [último acesso em 2018-06-18].
- [39] James Yin. Ankai Electric Buses to Support Beijing Olympics, 2007. URL: <http://www.chinabuses.com/english/news/0710/08001.htm> [último acesso em 2018-06-18].
- [40] BYD. BYD Auto, Build Your Dreams! URL: <http://www.bydeurope.com/company/profile.php> [último acesso em 2018-06-18].
- [41] Carlos Moura. Coimbra estreia autocarros elétricos da BYD em Portugal - Turbo Comerciais. URL: <http://www.comerciais-turbo.pt/coimbra-estrela-autocarros-eletricos-da-byd-portugal/> [último acesso em 2018-06-18].
- [42] Proterra. Electric Bus | Zero-Emission Bus | EV Bus, 2016. URL: <https://www.proterra.com/> [último acesso em 2018-06-18].
- [43] CaetanoBus. CaetanoBus Fabrico de Carroçarias e Autocarros. URL: <http://caetanobus.pt/pt/> [último acesso em 2018-06-18].
- [44] Antti Lajunen. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38:1–15, 2014. doi:10.1016/j.trc.2013.10.008.
- [45] A. Gis, W., Kruxzyński, S., Taubert, S., Wierzejski. Studies of energy use by electric buses in SORT tests. *VII International Congress on Combustion Engines*, 170(3), 2017. doi:10.19206/CE-2017-323.
- [46] Amela Ajanovic e Reinhard Haas. Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success. *Energy*, 115:1451–1458, 2016. doi:10.1016/j.energy.2016.05.040.
- [47] R. Reiner, O. Cartalos, A. Evrigenis, e K. Viljamaa. Challenges for a European Market for Electric Vehicles, 2010. URL: <http://www.europarl.europa.eu/document/activities/cont/201106/20110629ATT22885/20110629ATT22885EN.pdf> [último acesso em 15/05/2018], doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [48] U.S. Department of Energy. Cost and Price Metrics for Automotive Lithium-Ion Batteries. Relatório técnico, U.S. Department of Energy, 2017. URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/67089EERELIBcostvspricemetricsr9.pdf> [último acesso em 20/04/2018].
- [49] Aurélie Faure-Schuyer. The European Battery Alliance: Ambitions and requirements, 2018. URL: <https://www.ceps.eu/publications/european-battery-alliance-ambitions-and-requirements> [último acesso em 15/05/2018].
- [50] Maroš Šefčovič. Speech by Vice-President for Energy Union Maroš Šefčovič at the Industry Days Forum on the Industry-led initiative on batteries / the EU Battery Alliance. *European Commission - Speech*, 2018. URL: http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-18-1168_en.htm [último acesso em 15/05/2018].
- [51] European Commission. European Battery Alliance. URL: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance_en [último acesso em 2018-06-12].

- [52] Wiroj Taweepworadej e Panhathai Buasri. Vehicle Routing Problem for Electric Bus Energy Consumption and Planning. *Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engineering*, 3(2):224–226, 2016.
- [53] Heliox. Charging solutions - Driving your fleet around the clock. URL: <https://www.heliox.nl/> [último acesso em 2018-06-12].
- [54] Siemens. Charging systems for ebuses. URL: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/road-solutions/electromobility/ebus-charging.html> [último acesso em 2018-06-12].
- [55] Mercedes-Benz. Mercedes Citaro Euro V. URL: https://www.mercedes-benz.pt/content/portugal/mpc/mpc_portugal_website/ptng/home_mpc/bus/home/buses_world/record_run/result/Results_in_detail.html [último acesso em 2018-06-05].
- [56] Filipe Oliveira, Cláudia Henriques, Fábio Pereira, Figueira Rúben, e Hugo Vasconcelos. Demonstração do autocarro elétrico e.City Gold na Região Autónoma da Madeira. Relatório técnico, AREAM - Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira, 2018.
- [57] Wei Feng e Miguel Figliozzi. An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26:135–145, 2013. doi:10.1016/j.trc.2012.06.007.
- [58] Mais Gasolina - Preço dos combustíveis. URL: <https://www.maisgasolina.com/> [último acesso em 2018-06-05].
- [59] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Tarifas e preços para a energia elétrica e outros parâmetros para o período de 2018 e parâmetros para o período de regulação 2018-2020, 2017. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2018/Documents/Tarifas%20e%20Pre%C3%A7os%202018.pdf> [último acesso em 12/06/2018].
- [60] Ning Wang, Yun Li, e Yafei Liu. Economic evaluation of electric bus charging infrastructure. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, páginas 2799–2804, 2014. doi:10.1109/ITSC.2014.6958138.
- [61] Efacec. Efacec Electric Mobility | EV Homecharger. URL: <http://electricmobility.efacec.com/ev-qcbus/> [último acesso em 2018-06-17].
- [62] Efacec. Quick CHarge Station QC45. URL: <http://electricmobility.efacec.com/wp-content/uploads/2016/10/qcbus.pdf> [último acesso em 2018-06-17].
- [63] Eric Wood, Marcus Alexander, e Thomas H. Bradley. Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 196(11):5147–5154, 2011. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.02.025.
- [64] Isidor Buchmann. Battery Discharge Methods – Battery University. URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods [último acesso em 2018-06-06].

- [65] Anaíssia Franca, Julian Alberto Fernandez, Curran Crawford, e Ned Djilali. Assessing the impact of an electric bus duty cycle on battery pack life span. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, páginas 679–683, 2017. doi:10.1109/ITEC.2017.7993351.
- [66] Electrification Coalition. Electrification roadmap: Revolutionizing transportation and achieving energy security, 2009. URL: https://secureenergy.org/wp-content/uploads/2016/03/EC_Roadmap.pdf [último acesso em 21/05/2018].
- [67] TUG – Transurbanos de Guimarães. Horários. URL: <http://tug.com.pt/horarios/> [último acesso em 2018-06-20].
- [68] International Energy Agency (IEA). Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8):1–64, 2017. URL: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf) [último acesso em 15/05/2018].
- [69] Aswath Damodaran. Cost of equity and capital - Western Europe, Jan 2018. URL: http://people.stern.nyu.edu/adamodar/New_Home_Page/datacurrent.html [último acesso em 13/06/2018].
- [70] Maria Dulce Soares Lopes. *Elaboração e Análise de Projetos de Investimento*. FEUP Edições, 2011.
- [71] Fidelidade. Seguro Automóvel Tradicional. URL: https://www.fidelidade.pt/PT/particulares/Viagem-lazer/Seguros/Bicicleta/Documents/FI129_CG29_AUTO_Tradicional_out15.pdf [último acesso em 13/06/2018].
- [72] US Environmental Protection Agency. Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel, 2005. URL: <http://web.archive.org/web/20110805013516/http://www.epa.gov/otaq/climate/420f05001.htm> [último acesso em 13/06/2018], doi:10.1002/ep.10071.
- [73] Institute for European Environmental Policy (IEEP), Claudia Dias Soares, Ecologic, e IVM. Environmentally Harmful Subsidies: Identification and Assessment Annex 5 : Subsidy level indicators for the case studies, 2012. URL: <http://ec.europa.eu/environment/enveco/taxation/pdf/Annex5-Calculationsfromthecasestudies.pdf> [último acesso em 14/05/2018].
- [74] Iberdrola. Origem da Energia IBERDROLA Clientes. URL: <https://www.iberdrola.pt/02sicb/corporativa/iberdrola/sobre-nos/mercado-electrico/rotulagem-energia/iberdrola-clientes> [último acesso em 2018-06-14].
- [75] EDP. Conheça a origem da energia. URL: <https://energia.edp.pt/particulares/apoio-cliente/origem-energia/> [último acesso em 2018-06-14].
- [76] Endesa. Origem de Energia. URL: <https://www.endesa.pt/particulares/quemsomos/Origem-de-Energia> [último acesso em 2018-06-14].
- [77] Joint Research Centre European Commission. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission, 2017. URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [último acesso em 14/06/2018].

- [78] Joint Research Centre European Commission. Performance of grid-connected PV VE 1, 2018. URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [último acesso em 14/06/2018].
- [79] Joint Research Centre European Commission. Performance of grid-connected PV VE 2, 2018. URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [último acesso em 14/06/2018].
- [80] Hanwha Q CELLS. Q.Peak-G4.1 290-305, 2014. URL: https://www.q-cells.com/dam/jcr:59570e40-9ca8-4f24-a69f-83aaaf7b8f74/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPEAK-G4.1_290-305_2017-05_Rev06_EN.pdf [último acesso em 14/06/2018].
- [81] Ran Fu, Donald Chung, Travis Lowder, David Feldman, Kristen Ardani, Ran Fu, Donald Chung, Travis Lowder, David Feldman, e Kristen Ardani. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017 U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017, 2017. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf> [último acesso em 24/06/2018], doi:10.2172/1390776.