



Universidade de Aveiro  
Ano 2022

**ISAAC JOÃO  
TEIXEIRA MARTINS**

**INTRODUÇÃO DE FROTA 100% ELÉTRICA DE  
AUTOCARROS NO TRANSPORTE PÚBLICO – UM  
PASSO PARA A MOBILIDADE SUSTENTÁVEL**



Universidade de Aveiro  
Ano 2022

**ISAAC JOÃO  
TEIXEIRA MARTINS**

**INTRODUÇÃO DE FROTA 100% ELÉTRICA DE  
AUTOCARROS NO TRANSPORTE PÚBLICO – UM  
PASSO PARA A MOBILIDADE SUSTENTÁVEL**

Relatório de Projeto apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José Vasconcelos do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro

## **o júri**

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos  
professor associado da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira  
professor associado do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor José António de Vasconcelos Ferreira  
professor associado da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer a um grupo de pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à equipa da OPT, pela oportunidade e pela simpatia demonstrada.

Um agradecimento especial ao Doutor Fernando Vieira e à Eng<sup>a</sup> Sandra Lameiras, por me terem apoiado e dado a liberdade para desenvolver o projeto. Agradeço ainda ao Vítor Oliveira, pelo acompanhamento, e Inês Monteiro pelas conversas, apoio e conhecimento transmitido.

Por último, agradeço aos meus pais e irmãos por me darem todas as condições necessárias e mais algumas, pelo apoio incondicional, e por demonstrarem interesse pelo meu trabalho.

**palavras-chave**

Veículos Elétricos, Competitividade de Custo, Planeamento Operacional, Sistemas de Carregamento, GIST, Sustentabilidade

**resumo**

O setor da mobilidade é essencial para o normal funcionamento da sociedade, tendo-se assistido com o passar dos anos a uma evolução em tecnologias utilizadas, oferta de serviços e veículos usados. Apesar disso, este setor é responsável por quase 25% das emissões de gases com efeito estufa na Europa, sendo uma das principais causas de poluição atmosférica nas grandes cidades, contribuindo para um estilo de vida menos saudável e, conseqüentemente, para o aumento dos níveis de doenças associadas. A introdução da e-mobilidade e veículos elétricos no transporte público urbano pode ser considerado um fator chave para uma futura mobilidade sustentável, contribuindo para a redução da poluição do ar e das emissões de gases de efeito estufa, para além de assegurar as necessidades da população.

Neste contexto, este projeto para além de esclarecer o funcionamento de veículos elétricos e os comparar com veículos tradicionais movidos por combustão interna, em aspetos como funcionamento de baterias, estratégias de carregamento, demonstrar possíveis impactos da adoção desta nova opção, e dar a conhecer diferentes abordagens relativas à implementação deste tipo de veículos, procura igualmente demonstrar quais os possíveis custos que este novo panorama traz. É efetuada a medição e a comparação de custos relativos à nova frota, manutenção e operação, incluindo custos relacionados com possíveis novos serviços de viatura e tripulantes. Inclusive, é medido e comparado o impacto ambiental de uma frota 100% elétrica, através da estimação dos níveis de emissões de CO<sub>2</sub>.

Para a realização do estudo é usado o exemplo da STCP, empresa de transporte público que atua na Área Metropolitana do Porto, onde, após parametrização de dados referentes aos veículos elétricos, incluindo limitações como a autonomia, é feita a simulação do planeamento operacional utilizando o software desenvolvido e mantido pela OPT, GIST.

**keywords**

Electric Vehicles, Cost Competiveness, Operational Planning, Charging Approaches, GIST, Sustainability

**abstract**

The mobility sector is essential for the normal functioning of society, and over the years, there has been an evolution in technologies used, services offered, and vehicles used. Despite this, this sector is responsible for almost 25% of greenhouse gas emissions in Europe. It is one of the leading causes of air pollution in large cities, contributing to a less healthy lifestyle and associated diseases. The introduction of e-mobility and electric vehicles in urban public transport can be considered a key factor for future sustainable mobility, contributing to the reduction of air pollution and greenhouse gas emissions and ensuring the needs of the population.

In this context, this project, besides clarifying the reader about the operation of electric vehicles and comparing them with traditional vehicles powered by internal combustion, in aspects such as battery operation and charging strategies, demonstrate possible impacts of the adoption of this new option, and make known different approaches regarding the implementation of this type of vehicles, tries to show what are the possible costs that this new scenario brings. Costs related to the new fleet, maintenance and operation costs are measured and compared, including expenses related to potential new vehicle and crew services. The environmental impact of a 100% electric fleet is also measured and reached through the estimation of CO<sub>2</sub> emission levels.

To carry out the study, the example of STCP is used, a public transport company operating in Porto Metropolitan Area, where, after parameterization of data relating to electric vehicles, including limitations such as autonomy, the simulation of operational planning is made using the software developed and maintained by OPT, GIST.

## Índice

1. Introdução .....	1
1.1. Contexto do projeto .....	1
1.2. Projeto .....	1
1.3. Estrutura do documento .....	2
2. Revisão da literatura .....	3
2.1. Mobilidade Urbana Sustentável.....	3
2.2. Planeamento Operacional nos Transportes Públicos .....	7
2.3. Veículos elétricos – Novo Paradigma .....	8
2.3.1. Baterias e Carregamento.....	9
2.3.2. Abordagens ao problema do carregamento de autocarros elétricos .....	12
3. Contextualização do problema .....	18
3.1. Apresentação da empresa .....	19
3.2. Projeto.....	22
3.3. Metodologia do Projeto .....	23
4. Desenvolvimento .....	23
4.1. Análise da situação atual.....	23
4.3. Proposta .....	40
4.4. Resultados PO .....	40
5. Conclusões.....	45
5.1. Sumário do projeto e resultados.....	45
5.2. Reflexão sobre o trabalho desenvolvido.....	47
5.3. Future Trends .....	47
Anexos e Apêndices .....	49

## Índice de Figuras

Figura 1 - Custo Total de Propriedade de autocarros elétricos 2012/2030.....	18
Figura 2 - Print Interface GIST (a) .....	20
Figura 3 - Print Interface GIST (b).....	20
Figura 4 - Linha de autocarros com estações de carregamento (esquerda) e faixas de carregamento (direita) .....	28
Figura 5- Resultado no cenário nominal. ....	30
Figura 6 – Análise sensitiva tendo em conta a frequência f.....	32
Figura 7 -Análise sensitiva tendo em conta a distância de circulação l .....	33
Figura 8 – Análise sensitiva tendo em conta as horas de operação T .....	34
Figura 9 – Análise sensitiva em relação à velocidade de operação v.....	35
Figura 10 – Análise sensitiva em relação ao custo de produção de uma bateria C.....	35
Figura 11 – Análise sensitiva em relação ao poder de carregamento nas estações.....	36
Figura 12 – Mudança da competitividade de diferentes estruturas de carregamento tendo em conta a frequência e a distância de circulação para diferentes níveis de velocidade (I-III representa os domínios competitivos de estações de carregamento, estações de troca e faixas de carregamento, respetivamente) .....	37
Figura 13 – Cruzamento de Dados numa perspetiva de competitividade de custo entre os 3 diferentes tipos de estruturas de carregamento .....	39



## Índice de Tabelas

Tabela 1 -Definições de parâmetros e valores default. ....	29
Tabela 2 - Resultado Simulação em Relação às Viaturas .....	41
Tabela 3 - Resultado Simulação em Relação aos Tripulantes .....	41
Tabela 4 - Resultado Simulação em Relação à Distância Total Percorrida (km) .....	42
Tabela 5 - Resultado Simulação em Relação à Distância Total Percorrida em Vazio (km) .....	42
Tabela 6 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo em Vazio (min) .....	42
Tabela 7 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo em Paragem (min).....	43
Tabela 8 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo Total (min) .....	43
Tabela 9 - Custo de Ciclo de Vida de uma viatura elétrica, a diesel e CNG.....	45

## Lista de Acrónimos e Siglas

AE	Autocarros Elétricos
BEB	Battery Electric Buses
CO2	Dióxido de Carbono
CTP	Custo Total de Propriedade
ETP	Estações de Troca de Bateria
E-VSP	Electric Vehicle Scheduling Problem
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIST	Gestão Integrada de Sistemas de Transportes
OPT	Optimização e Planeamento de Transportes, S.A.
OMS	Organização Mundial de Saúde
STCP	Sociedade de Transportes Públicos do Porto
UE	União Europeia
VCI	Veículos de Combustão Interna
VE	Veículos Elétricos
VSP	Vehicle Scheduling Problem

## 1. Introdução

### 1.1. Contexto do projeto

O projeto em causa representa a conclusão do mestrado integrado em Engenharia e Gestão Industrial pela Universidade de Aveiro.

O objetivo de ter um projeto como base para a escrita da dissertação foi o de poder aplicar conhecimentos adquiridos a situações práticas envolvidas na adoção de metodologias apropriadas de maneira a ultrapassar um desafio específico no âmbito empresarial. O estágio curricular decorreu na OPT (Optimização e Planeamento de Transportes), uma empresa que trabalha nas áreas da tecnologias e mobilidade.

O tema escolhido tem por base a sustentabilidade que é considerado o tema grande do século XXI, e toca ainda no setor da mobilidade, um dos setores que mais influenciam a sustentabilidade. O grande objetivo e ambição era o de perceber de que maneira estas duas áreas se cruzam, onde chocam e quais as oportunidades que existem para um futuro onde o setor dos transportes possa ser considerado sustentável dentro das grandes cidades. Assim, espero que este projeto contribua para um aumento na qualidade de vida em regiões urbanas através da integração de uma rede e planeamento sustentável que satisfaça as necessidades dos seus utilizadores.

Reforçar ainda a ideia de que a Engenharia Industrial não está ligada apenas a fábricas e linhas de produção. Uma cidade é, de facto, uma grande empresa que precisa ser otimizada, gerindo melhor os recursos existentes ou aplicando novas tecnologias e sistemas avançados que permitam aumentar o conhecimento noutras áreas. E, uma vez que a parte industrial não está presente neste trabalho, que está integrado no setor dos serviços, o *mindset* enraizado de melhoria contínua, sentido crítico, análise de estatísticas e data no processo de decisão foram extremamente úteis na realização deste projeto.

### 1.2. Projeto

A OPT nasceu em 1992 e desenvolve produtos em 3 áreas, planeamento e gestão de transporte público, informação ao público e consultoria em mobilidade urbana.

O desafio a ser explorado nesta tese surge através da necessidade de descarbonização do setor dos Transportes Públicos que tem obrigado nos últimos anos os operadores a alterar a frota, com a adoção de veículos movidos a gás natural e veículos elétricos. Há também uma necessidade de otimização no planeamento operacional com a introdução de veículos elétricos, pois trata-se de veículos com diferentes características dos veículos tradicionais movidos por combustão interna, o que leva à adaptação do planeamento já existente.

Assim, o desafio baseia-se do estudo da introdução de uma frota 100% composta por veículos elétricos ao nível operacional, sendo importante perceber as necessidades de viaturas e tripulantes, as restrições de autonomia, tipos de carregamento, afeção de custos e ainda avaliação das diferenças na emissão de CO<sub>2</sub>.

### 1.3. Estrutura do documento

O relatório do projeto começa por apresentar literatura relevante ao tema no capítulo 2. Começa por retratar o estado atual dos Transportes Públicos e o porquê da necessidade da neutralidade carbónica para contextualizar o leitor sobre o tema. Depois é explorado o impacto ambiental do setor nos transportes, onde são apresentados estudos relativos à situação atual e qual o papel do setor numa visão geral sobre a sustentabilidade. De seguida é apresentada a eletrificação dos transportes como uma solução para a mobilidade sustentável. É apresentado o Planeamento Operacional nos transportes públicos e é explorado mais a fundo a introdução de veículos elétricos no transporte público, assim como as especificações deste tipo de veículos, tipos de baterias, estratégia de carregamentos e exemplos da aplicação de diferentes estratégias.

No capítulo 3 é apresentado o projeto realizado na empresa, e inclui uma apresentação detalhada da mesma, as áreas em que atua, os produtos que desenvolve e clientes. O desafio é clarificado em detalhe e é apresentada a metodologia para o projeto.

No capítulo 4 é analisada a situação atual no que toca ao planeamento operacional utilizado pela STCP, empresa que opera na área metropolitana da cidade do Porto, quais as características da cidade e do planeamento. É apresentado o software de apoio à decisão GIST onde o planeamento é realizado, e analisado o artigo que serve de base para o desenvolvimento do projeto., sendo aplicadas as conclusões do mesmo artigo ao caso em estudo, o planeamento da STCP na cidade do Porto. Finalmente, é proposto uma estratégia para a operação de uma frota 100% elétrica, apresentados custos e emissões.

O capítulo 5 inclui uma reflexão sobre o projeto desenvolvido, com análise dos resultados e tendências para o futuro.

## 2. Revisão da literatura

### 2.1. Mobilidade Urbana Sustentável

O setor do transporte público é essencial para o normal funcionamento da sociedade e, ao longo dos anos, tem-se assistido a uma evolução quer ao nível da oferta de serviços quer ao nível dos veículos utilizados. Ainda assim, o impacto ambiental deste setor obriga a que sejam adotadas frotas mais limpas sem prejuízo da viabilidade económica da sua operação. Neste capítulo será abordado o papel dos transportes públicos como um dos principais pilares da mobilidade sustentável, assim como a necessidade de eletrificação das frotas.

O setor dos transportes é responsável por quase 25% das emissões de gases com efeito de estufa na Europa e é também a principal causa da poluição atmosférica nas grandes cidades. Com o passar dos tempos, a população global tem-se concentrado cada vez mais nas cidades (Foltyński et al., 2019), sendo que atualmente, cerca de 55% da população vive em áreas urbanas (United Nations et al., 2018), e estima-se que esse valor aumente e ultrapasse 61% em 2030 e 70% em 2050 (Lerner et al., 2011). Este aumento de população a viver nas cidades implica que haja uma nova adaptação, de maneira que o sistema de transportes tenha capacidade para dar resposta às necessidades. Caso os serviços de transporte público não estejam preparados para a maior complexidade do problema, há a hipótese de que a população opte pelo transporte individual em detrimento do transporte coletivo. Consequentemente, o aumento do número de veículos rodoviários em circulação vai criar mais desafios, não só ao nível da poluição atmosférica e sonora, mas também ao nível de congestão de tráfego nas cidades.

Cerca de 90% dos habitantes das cidades da União Europeia (UE) estão expostos a níveis de poluentes atmosféricos considerados prejudiciais pela Organização Mundial de Saúde (OMS), sendo que aproximadamente 95% dos veículos nas estradas europeias ainda utilizam combustíveis fósseis. Assim, o transporte é a principal causa da poluição do ar nas cidades (European Commission et al., 2017) que constitui um perigo significativo para os seus moradores (Kumar et al., 2015).

A poluição do ar é um fator de risco para a saúde ambiental global e é uma questão relevante em termos de saúde e bem-estar. Para além das doenças associadas, é um dos principais fatores de risco de morte, sendo responsável por cerca de cinco milhões de mortes por ano, correspondendo este número a 9% das mortes em todo o mundo (Hannah Ritchie & Max Roser et al., 2017). Estas mortes devem-se a acidentes vasculares cerebrais, doenças cardíacas isquémicas, doenças pulmonares, doenças obstrutivas crónicas, cancro do pulmão, infeções respiratórias inferiores, ou ainda, diabetes (Hannah Ritchie & Max Roser et al., 2017). Desta forma, sendo o setor do transporte um dos maiores poluentes, acaba por se tornar num dos principais responsáveis no que toca a estes problemas de saúde (Anenberg et al., 2019).

Este fenómeno tem também impacto ao nível da economia [Qiu & He et al., 2017], (Tögel & Špička et al., 2014)], uma vez que o aumento dos custos de saúde, baixas, e mortes prematuras reduzem a produtividade económica (González Ortiz et al., 2018). Assim, a poluição nas cidades foi reconhecida como um dos principais fatores críticos do desenvolvimento social futuro.

De acordo com os dados divulgados pela Agência Internacional de Energia (AIE), recomenda-se tomar medidas imediatas no setor de transporte nas próximas décadas para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> até 2050 e, para inverter esta tendência, a UE e os seus Estados-Membros têm vindo a tomar várias medidas para reduzir o impacto negativo do setor na saúde e no ambiente. Na COP21, 195 países adotaram o primeiro acordo climático global universal e juridicamente

vinculativo, mostrando uma preocupação universal com o aquecimento global. O Conselho Europeu definiu o objetivo de redução de gases com efeito de estufa (GEE) até 40% até 2030, face aos níveis de 1990. Sem estabelecer um objetivo obrigatório, o Livro Branco sobre os Transportes também estabeleceu o objetivo de reduzir em 60% as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nos transportes até 2050 (Cansino et al., 2018).

Como resultado de medidas já aplicadas, o setor do transporte na Europa tem vindo a reduzir significativamente as emissões de alguns dos principais poluentes atmosféricos – principalmente devido à introdução de padrões de emissões, aplicação de medidas financeiras (impostos), introdução de combustíveis alternativos e medidas para evitar o uso de transporte individual (EEA et al., 2016). Ainda assim, as emissões do setor de transportes da UE não estão a baixar o suficiente para limitar os seus impactos ambientais e climáticos na Europa.

Para além disso, e como referido anteriormente, há um problema real no que toca ao aumento excessivo do número de automóveis na Europa, o que constitui um desafio para as autoridades. De acordo com os dados apresentados pela Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis (ACEA), no ano de 2018, a UE conta com 511 carros por 1000 habitantes sendo que a frota de automóveis de passageiros da UE cresceu 5,7% nos últimos cinco anos – com o número de veículos na estrada a passar de 243 para 257 milhões [ACEA et al., 2018], sendo estes predominantemente de sistema de propulsão e, por isso, dependentes de combustíveis fósseis (Saighani & Sommer et al., 2017),(Lah et al., 2017). Por outro lado, os autocarros são o meio de transporte público mais utilizado na EU, servindo as cidades, zonas suburbanas e zonas rurais. Os dados de seguida apresentados confirmam a importância do papel deste meio de transporte nos sistemas de mobilidade (ACEA et al., 2018):

- Existem mais de 690 mil autocarros em operação em toda a UE;
- Na UE, 55,7% de todas as viagens de transporte público (ou 32,1 mil milhões de viagens de passageiros por ano) são feitas de autocarro urbano e suburbano.

Os autocarros são considerados um elo importante na cadeia de mobilidade multimodal e constituem um fator importante para a implementação de uma política de transportes sustentável, pelo que o estudo da sua transferência para a eletromobilidade pode e deve ser incentivada. Os dados a seguir confirmam a importância dos autocarros nesse aspeto (ACEA et al., 2018):

- Um autocarro é capaz de substituir 30 carros na estrada, ajudando a aliviar o congestionamento do tráfego;
- Apresentam uma pegada de carbono por passageiro menor do que qualquer outra forma de transporte motorizado.

Além disso, os autocarros urbanos são vistos como um elemento prioritário para a eletrificação, uma vez que as suas rotas são previsíveis, permitindo baterias menores e uma infraestrutura de carregamento planeada (Mutter, 2019). A importância do tema aqui levantado também é confirmada pelos dados relacionados com o uso de fontes alternativas de energia no transporte. Os automóveis de passageiros com motor alternativo representam apenas 3,4% da frota automóvel total da UE (ACEA et al., 2021).

Para concluir, existe a necessidade reconhecida de implementar mais medidas tanto a nível internacional como doméstico, de forma a reduzir significativamente o efeito negativo do transporte sobre as pessoas e o meio ambiente. Uma das estratégias mais adotadas pelo setor passa pelo aumento da eficiência energética do transporte público que permitirá diminuir o

consumo total de energia. A passagem para uma mobilidade elétrica tornou-se um dos conceitos emergentes mais explorados e, por isso, a adoção de veículos elétricos (VEs) poderá contribuir fortemente para diminuir as emissões a nível local e global (X. Li et al., 2017).

O transporte público é crucial para as sociedades modernas com populações crescentes. O transporte público pode ser considerado um serviço prestado por agências públicas ou privadas que está disponível para todas as pessoas que pagam a tarifa prescrita (Vuchic et al., 2007). Além disso, o transporte público tem as seguintes características:

- Transferência em massa eficiente de passageiros;
- Facilidade de acesso, de forma que qualquer pessoa tenha condições de utilizar o transporte público;
- Transporte ao longo de um sistema organizado de rotas fixas; e
- Com base em um horário pré-definido, resultando em intervalos fixos de transporte ao longo de rotas específicas.

O número de viagens realizadas por habitante, independentemente do motivo ou contexto está a crescer e é esperado que a mobilidade urbana deverá duplicar até 2025 (Clairand, Guerra-Terán, et al., 2019). Daqui resultam crescentes necessidades de transporte, tanto na área do transporte de mercadorias (entrega de vários tipos de bens e serviços) como no transporte de passageiros (deslocamento para o trabalho, casa, escola, saúde, cultura, desporto ou centros recreativos). O aumento da procura de transportes nas zonas urbanas e a necessidade de satisfazer as crescentes exigências dos clientes em termos de disponibilidade, tempo e conforto, têm influência no crescente número de veículos e na intensificação dos congestionamentos rodoviários, poluição sonora (ruído) e da sinistralidade rodoviária.

Um aumento na adoção do transporte público e uma mudança tecnológica são, por isso, fundamentais para cumprir o objetivo da UE de descarbonizar o setor de transporte até 2050. Numa perspetiva Well-to-Wheels, que analisa o impacto ambiental de um produto durante o seu ciclo de vida, e incluindo as emissões relacionadas com a produção, processamento, distribuição e utilização de combustível, os veículos elétricos emitem menos dióxido de nitrogénio e partículas finas do que os veículos com motor de combustão interna (Clairand, Guerra-Terán, et al., 2019; Olsen & Kliewer, 2020). Para reduzir a influência negativa do transporte urbano na economia, no meio ambiente, na saúde e na vida humana, o setor dos transportes tem-se comprometido a desenvolver novas tecnologias e iniciativas, relacionando-as com várias áreas de estudo (Cordera et al., 2019), incluindo:

- o desenvolvimento e promoção do transporte público como solução que permite uma utilização mais eficiente das redes rodoviárias e oferta de uma mobilidade socialmente mais equitativa e limpa que os veículos particulares;
- a limitação do desenvolvimento do transporte automóvel privado;
- a integração de vários meios e modos de transporte (multimodalidade);
- a garantia de uma repartição racional das atividades de transporte entre modos de transporte individuais;
- o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias de transporte e entrega amigas do ambiente;
- a promoção de formas alternativas de movimento nas áreas urbanas e promoção de mudança no comportamento e hábitos da população.

Para além da reorganização do sistema de transportes, a eletromobilidade (e-mobilidade) surge como parte integrante da estratégia que visa a sustentabilidade do setor em áreas urbanas que consiste na adoção de veículos elétricos (VEs) como alternativa aos veículos de combustão (Zhuge et al., 2019). É, por isso, considerada uma das ações mais importantes nas atividades destinadas a limitar a influência negativa do transporte no meio ambiente (Auvinen et al., 2016) e constitui uma alternativa viável face aos sistemas de mobilidade tradicionais, ganhando importância ano a ano em toda a UE (Skrúcaný et al., 2019),(Milojević et al., 2018).

A e-mobilidade e os VEs podem-se tornar um fator chave da mobilidade sustentável no futuro (Wappelhorst et al., 2014), contribuindo para a redução da poluição do ar e das emissões de GEE (Qi et al., 2018), para além de assegurar as necessidades da população. A ausência de emissões por parte dos VEs é particularmente importante em áreas urbanas, sendo que estas são caracterizadas por alta densidade populacional e tráfego intenso. Supõe-se, portanto, que a e-mobilidade se possa tornar a tecnologia dominante aplicada na mobilidade futura em zonas urbanas. Uma das prioridades no desenvolvimento de um sistema de transporte verde e sustentável depende da crescente participação de veículos eficientes e ecológicos na frota, bem como o uso de combustíveis verdes, incluindo o gás natural (Makarova et al., 2015).

Embora sejam mais ecológicos e utilizem tecnologias inovadoras, a capacidade competitiva dos autocarros elétricos é inferior quando comparada aos autocarros a diesel ou híbridos. Um estudo elaborado por Lajunen (2018) envolveu a análise de custos ao longo do ciclo de vida de autocarros elétricos utilizados em diversas rotas, nomeadamente nos resultados da simulação de quatro rotas de autocarros na Finlândia e na Califórnia, EUA. Foi demonstrado que os custos de capital necessários para a aquisição dos veículos e carregadores afetaram significativamente os gastos incorridos ao longo do ciclo de vida dos autocarros elétricos. Uma das medidas que permite mitigar o risco associado ao investimento inicial pela criação de programas governamentais de apoio ao uso generalizado de veículos elétricos (Langbroek et al. 2016). Contudo, é necessário considerar os requisitos de carregamento, os custos de consumo de energia e os custos ao longo de todo o ciclo de vida (Lajunen et al. 2018), (Rogge et al. 2018).

É necessário considerar que alguns problemas dos autocarros elétricos podem ser atribuídos a especificidades de projeto que podem influenciar negativamente a performance, pelo que é importante desenvolver uma infraestrutura (uma rede de estações de recarga e manutenção) capaz de garantir a segurança da operação.

No fundo, este tipo de viatura combina a compatibilidade ambiental dos troleicarros com a autonomia e manobrabilidade dos autocarros para além de serem praticamente silenciosos, fáceis de operar, confiáveis e duradouros. Em relação aos veículos elétricos tradicionais, como tróleis e elétricos, os autocarros elétricos apresentam:

- Custos iniciais para o desenvolvimento de infraestrutura mais reduzidos;
- Custos operacionais mais baixos devido à manutenção regular menos frequente e mais barata da frota, pois essas operações não envolvem materiais consumíveis como óleos de motor e transmissão;
- Flexibilidade na alteração de rotas caso existam variações dos fluxos de passageiros;
- Garantia de segurança da operação, não havendo risco de descarrilamento (elétricos) em caso de manutenção inadequada das vias



- Elevado grau de conforto acústico (vibrações causadas pelos elétricos podem gerar ruído na envolvente, exigindo a instalação de telas de ruído);
- Baixo desgaste da infraestrutura (os veículos elétricos tradicionais implicam corrente de tração traseira que pode vaziar para o solo, e essas "correntes de fuga" intensificam a corrosão e influenciam negativamente os cabos e dutos próximos).

Para concluir, e como já referido, para além de contribuir para a diminuição da emissão de poluentes, o uso de autocarros elétricos atuais traduz-se em melhorias no conforto das viagens em transporte público terrestre devido aos baixos níveis de ruído e vibração no interior dos veículos, na disponibilidade de serviços para passageiros (carregador USB) e nas acessibilidades (através do piso rebaixado).

Ainda assim, a introdução destes veículos no Planeamento Operacional traz novos desafios que precisam ser analisados.

## 2.2. Planeamento Operacional nos Transportes Públicos

A atribuição de serviços para veículos como uma tarefa essencial no planeamento operacional pelas empresas de transporte público.

Um horário contém viagens com horas específicas e tabeladas. O objetivo do planeamento é determinar a atribuição de veículos a viagens a um custo mínimo. Um veículo pode realizar viagens em vazio, que representam viagens sem transporte de passageiros, de maneira a deslocar-se, o que é especialmente importante quando a mesma viatura faz diferentes linhas, ou quando inicia ou termina um serviço e retorna à estação de recolha.

Os serviços de viatura criados precisam satisfazer as seguintes restrições (Olsen & Kliewer et al., 2020):

- Um serviço de viatura consiste em viagens compatíveis, ou seja, as viagens devem ser executadas sucessivamente sem sobreposição de tempo;
- Cada viagem é atribuída uma vez apenas;
- Um veículo começa e termina na mesma estação de recolha.

Este problema básico de otimização é amplamente conhecido como *Vehicle Scheduling Problem* (VSP). O objetivo do e-VSP é determinar a atribuição de serviços de viatura ideal para um conjunto de viagens, levando em consideração todas as restrições relacionadas aos VEs (Olsen & Kliewer et al., 2020).

O *Vehicle Scheduling Problem* (VSP) também pode ser considerado como a tarefa de construir um conjunto ótimo de serviços de viatura. As restrições e critérios de otimização podem diferir de uma configuração de problema para outra.

Ao introduzir os BEBs, *Battery Electric Buses*, restrições adicionais devem ser levadas em consideração:

- Estes veículos têm alcances limitados devido à capacidade limitada das baterias;

- As baterias do veículo só podem ser recarregadas em estações de carregamento localizadas dentro da rede.

Este problema é denominado como o Electric Vehicle Scheduling Problem (E-VSP) e é uma extensão do VSP tradicional.

Outros autores acrescentam algumas restrições ao problema do E-VSP (Yao et al., 2020):

- Em todos os momentos, a quantidade de energia na bateria deve ser suficiente para dirigir até à próxima estação de carregamento ou recolha;

- Num determinado conjunto de locais, a bateria pode ser carregada. Isso leva tempo e deve ser feito com o veículo parado. Também pode ser possível a troca de bateria.

A adoção destes veículos tem um impacto que não se limita ao planeamento operacional, mas cobre áreas como o uso de novas tecnologias e energias, tendo consequências nos níveis de consumo e de emissões.

### 2.3. Veículos elétricos – Novo Paradigma

É necessário então uma análise mais profunda sobre os impactos deste tipo de veículos em termos de emissões, perceber prós e contras e perceber que diferentes tipos existem.

A aplicação da energia elétrica como fonte alternativa de energia para veículos permite o desenvolvimento do conceito de mobilidade sustentável. Este conceito visa reduzir o número de veículos com motor de combustão, particularmente nas áreas urbanas, e assim reduzir a sua influência negativa no ambiente e na saúde humana (Higueras-Castillo et al., 2019).

No entanto, a implementação dos pressupostos da e-mobilidade tem atualmente uma série de obstáculos e limitações. Há uma gama limitada de veículos disponíveis no mercado, o seu elevado preço de compra, há uma má preparação da rede elétrica, a rede de estações de carregamento é limitada, assim como o alcance dos VEs (Plewa & Strozik et al., 2019),(Macioszek et al., 2019). Há ainda a acrescentar o facto da quota das fontes de energia renováveis (FER) no equilíbrio global da produção de energia ser demasiado baixa.

É significativo que o desenvolvimento futuro da e-mobilidade e seus objetivos dependam do grau de preparação do mercado de geração de energia (produtores e distribuidores de eletricidade). Deve-se ter em consideração que o crescimento dinâmico projetado da participação dos VEs no mercado de transporte contribuirá para um aumento dinâmico da procura por eletricidade, o que resultará na necessidade de adaptação do mercado às novas exigências dos seus utilizadores. O sucesso dos VEs no futuro também será determinado pelo preço e confiabilidade da bateria, o que pode reduzir os custos de operação e os preços dos veículos novos. A decisão de compra de um veículo elétrico também pode depender de subsídios concedidos a produtores e consumidores, que afetam a competitividade desses veículos (Dalla Chiara et al., 2019).

É preciso entender também que dentro dos Veículos Elétricos vários tipos podem ser distinguidos.

Em particular, os VEs não geram poluição local e têm uma eficiência energética muito mais significativa do que a dos veículos de combustão interna (VCIs). No entanto, os VEs apresentam impactos ambientais, especialmente devido ao uso de baterias de lítio. A fase de fabricação

corresponde à maior carga ambiental dos VEs, principalmente nas categorias de toxicidade devido ao uso de metais na bateria (Tagliaferri et al., 2016). Para resolver esses problemas, é crucial minimizar as perdas de energia na bateria e desenvolver ferramentas de reciclagem adequadas (Zackrisson et al., 2016).

Apesar desses problemas, os VEs podem reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> com a maioria dos cenários de mix de geração. Deve-se ressaltar que VEs podem parecer “limpos” porque não geram emissões durante a condução, o que nem sempre é verdade. Tal conclusão é na maioria das vezes o resultado da aplicação do método TTW (Ahn et al., 2018), que limita o exame da emissão apenas ao consumo de energia do veículo, em vez de analisar também todo o ciclo de vida, incluindo a produção: se a eletricidade for gerada apenas a partir do carvão, as emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida dos VEs ainda são semelhantes às dos VCIs (Wu et al., 2012), (Shen et al., 2012), (R. Wang et al., 2015).

Ainda assim, vários governos em diferentes países estão a promover a compra de VEs com incentivos económicos. A substituição de VCIs por VEs oferecerá o potencial de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Embora os VEs apresentem diversas vantagens ambientais, a introdução massiva deles poderia gerar diversos problemas na rede elétrica, o que vem sendo estudado por diversos investigadores.

Para projetar uma frota de transporte público de autocarros elétricos (AE) otimizada é essencial selecionar a tecnologia de armazenamento de energia adequada para cada contexto operacional. Os parâmetros da bateria (tamanho, vida útil e assim por diante) dependem fortemente das condições de trabalho, mas, ao mesmo tempo, influenciam diretamente o custo geral e o desempenho dos autocarros elétricos. As características específicas das cidades definem diversos tipos de baterias dos autocarros, pois cada cidade localiza os pontos de carregamento em diferentes posições. A orografia tem um papel importante na introdução de VEs, tendo um impacto direto no desempenho e na vida útil da bateria. Portanto, é necessário analisar o comportamento da bateria sob requisitos específicos de mobilidade elétrica antes de selecionar a tecnologia mais adequada para cada aplicação.

Como mencionado acima, os VEs a bateria são veículos totalmente alimentados por uma bateria, a fim de diferenciá-los de veículos de combustão interna VCIs, VEs híbridos e VEs híbridos plug-in. Normalmente, o seu alcance é muito menor do que outros tipos de veículos, mas são muito mais eficientes e ecológicos. Os VEs são alimentados por eletricidade, que é armazenada na bateria. Além disso, a configuração para autocarros inclui dispositivos auxiliares, um motor elétrico, um sistema de transmissão e um comando final.

### 2.3.1. Baterias e Carregamento

O tipo de bateria usado em diferentes veículos tem impacto em todo o desenho do veículo. Há diferentes tipos de baterias, e baterias podem ser compostas por diferentes tipos de materiais, sendo as mais utilizadas as baterias de lítio.

As baterias de lítio têm uma excelente combinação de alta energia e densidade de potência, tornando-a a tecnologia preferida quer para veículos híbridos, como para veículos totalmente elétricos (Nitta et al., 2015). No entanto, existe uma grande variedade de tecnologias de íões de lítio, cada uma delas adequada para diferentes aplicações.

A primeira tecnologia a emergir utilizando íões de lítio foi o LiCoO<sub>2</sub> (LCO). O LCO é um material que tem capacidade específica teórica relativamente alta, alta capacidade volumétrica teórica, alta tensão, bom desempenho de ciclagem e baixa auto descarga (du Pasquier et al., 2003).

As limitações desta tecnologia são a baixa estabilidade térmica, baixa resposta sob condições de trabalho em stress (altas taxas de carga ou descarga) e elevado custo. Por estas razões, esta é a tecnologia mais utilizada em aplicações portáteis, onde o volume e o peso da bateria são os parâmetros mais críticos. No entanto, não é adequado para aplicações de mobilidade elétrica. Há, no entanto, novos tipos de baterias de lítio promissoras na aplicação para viaturas elétricas devido aos pontos fortes de longa vida útil, alta potência específica e/ou energia específica e alto desempenho térmico e de segurança.

Juntamente com as características técnicas, a viabilidade económica é outra característica fundamental para selecionar uma tecnologia de bateria específica. O preço médio das baterias de íão de lítio em dezembro de 2017 foi de 209 \$/kWh, aproximadamente 195€/kWh, com queda de 79% desde 2010 (Curry et al., 2017). É ainda expectável que os preços desçam abaixo dos 100\$/kWh, aproximadamente 93€/kWh, até 2025 (BNEF) com previsão da possível paridade de custos entre motores de combustão interna e veículos elétricos para a segunda metade da década de 2020.

Com este cenário de mudança, torna-se importante reavaliar conclusões e cenários anteriores. A redução do preço da bateria terá impacto na tecnologia de longo alcance.

Diferentes tipos de baterias pedem diferentes estratégias de carregamento. Importante perceber e analisar quais as diferenças nestas estratégias e quais devem ser aplicadas para que casos.

Em geral, a autonomia tem sido a principal barreira para a mobilidade elétrica urbana. A melhoria do desempenho da bateria e o desenho de novas estratégias de recarga acabaram por reduzir o tamanho do problema, confirmando que as frotas de veículos elétricos são uma solução de mobilidade eficaz para as atividades diárias de viagem. No entanto, este objetivo só é possível selecionando a bateria adequada para a aplicação e acoplando-a à infraestrutura de recarga ideal. Não existe uma solução definitiva no que toca ao problema, pois diferentes veículos têm diferentes requisitos de energia dependendo do uso (urbano, suburbano, etc.), número e comprimento das paragens de autocarros, clima e assim por diante. Outros aspetos fundamentais são o tempo disponível por paragem, o tempo de almofada nas paragens finais, a infraestrutura da rede elétrica e as tarifas elétricas.

A estratégia de carregamento deve ser selecionada tendo em conta principalmente o tempo de carregamento disponível e a capacidade da bateria de aceitar o carregamento rápido ou não. A tecnologia do carregador depende principalmente da estratégia selecionada, da possibilidade de colocar o hardware necessário a bordo e das características da rede elétrica.

De seguida analisam-se as principais diferenças entre os diferentes tipos de carregamento (Clairand, Guerra-Terán, et al., 2019):

- Carregamento lento: Este tipo de carregamento aplica-se a autocarros com grandes baterias (acima de 300 kWh) e carrega até um máximo de 50 kW, recarregando os autocarros no intervalo de tempo de 3 a 6 horas. Este tipo de carregamento permite rotas flexíveis (por exemplo, no caso de obras rodoviárias) ou mudanças de rotas (S. Li et al., 2013). No entanto, o carregamento durante o dia não é possível, o que reduz o tempo de disponibilidade dos

autocarros. Baterias maiores podem resolver esse problema, mas adicionam peso extra ao veículo e, assim, reduzem a eficiência energética dos autocarros e aumentam os custos.

- Carregamento rápido: Os autocarros que usam carregamento rápido usam baterias menores que podem ser carregadas com maior potência do que os que usam carregamento lento, cerca de 50 a 200 kW para carregamento indutivo e até 500 kW para carregamento condutivo. Estes veículos têm uma autonomia menor, mas tempos de carregamento mais curtos e, podendo ser carregados várias vezes durante a operação (Rogge et al., 2015). Baterias menores permitem viaturas mais leves e maior eficiência energética. Preciso ressaltar que o carregamento rápido só é possível em algumas tecnologias de bateria, reduzindo a vida útil da bateria se não for aplicado segundo as instruções técnicas dos fabricantes das baterias. Além disso, o carregamento rápido exige custos mais altos de inversão de hardware e sobrecarrega a rede elétrica (alta exigência de energia em curtos períodos).

- Travagem regenerativa: Na travagem regenerativa, a perda de energia cinética da travagem é armazenada e posteriormente realimentada para fornecer energia ao motor elétrico. No entanto, produz uma degradação mais agressiva da bateria (redução do ciclo de vida da bateria e da energia da bateria) do que o carregamento rápido porque a mistura de picos de carga/descarga é um perfil de ciclo de bateria muito exigente (Anseán et al., 2016), (Anseán et al., 2013).

- Combinação de carregamento lento com carregamento de oportunidade: estes veículos utilizam carregamento lento no final do percurso e carregamento rápido no percurso. O dimensionamento correto das baterias e os requisitos de uso garantem a maior eficiência energética e o menor stress para a rede elétrica. No entanto, esta combinação implica maiores custos de inversão de hardware.

- Carregamento em movimento: O carregamento em movimento (IMC) é um sistema que consiste em autocarros de bateria com pequenas baterias (<50 kWh) que são carregadas através de fios aéreos em secções selecionadas de uma rota, às quais os veículos se conectam a postes. A potência de carregamento parado é maximizada em 100 kW devido às restrições de calor da tomada que conecta os postes dos autocarros aos fios aéreos. O carregamento durante a condução é menos stressante para a rede elétrica porque é feito com menor potência e, devido a serem necessários menos quilómetros de cabos aéreos, a infraestrutura é mais barata do que para um sistema tradicional de elétrico. As pequenas baterias permitem autocarros leves e energeticamente eficientes. O carregamento em movimento também pode ser feito através de indução, sendo wireless, através da introdução de placas de indução elétrica debaixo das faixas de rodagem.

- Troca física das baterias: Neste caso, as baterias são trocadas quando esgotadas e substituídas por baterias carregadas nas estações de troca de baterias. Além disso, o carregamento é programado. Portanto, é o sistema mais rápido e menos stressante para a rede elétrica, minimizando também o custo da eletricidade. No entanto, só é economicamente viável em alguns casos devido ao custo adicional das baterias de reserva e ao preço da mão de obra.

- O carregamento indutivo usa um dispositivo de carregamento instalado no solo. O sistema indutivo dispensa qualquer remodelação urbana que cause impacto visual na cidade e garante eficiência, sustentabilidade, segurança e versatilidade do sistema. Tecnicamente, o sistema de carregamento indutivo tem um desempenho de 85-90 por cento, inferior à carga de contato, mas não exige que as viaturas parem completamente se estiverem completamente descarregadas. O sistema de carregamento indutivo é mais seguro porque só funciona quando

um autocarro está presente na estação de carregamento. Por outro lado, o carregamento condutivo geralmente é feito com um pantógrafo montado no autocarro ou num poste, é mais barato de instalar e foi amplamente testado.

- Pantógrafo *top-down off-board*: O pantógrafo *top-down* é um sistema de carregamento rápido que pode ser montado num mastro ou teto de uma paragem de autocarros. Os pantógrafos carregam as baterias do autocarro o suficiente para chegar ao próximo ponto de carregamento, sendo todo o processo de conexão e carregamento totalmente automático. Esta solução de carregamento *offboard* pode ser usada com vários tipos de autocarro e diferentes condições de rede elétrica. Embora esta tecnologia use principalmente postes de carga de corrente contínua de alta potência para carregamento de veículos pesados, tem sido aplicada em casos de pequena escala, como os projetos Siemens eHighway na Califórnia (Riddett et al., 2015) e na Alemanha (Siemens et al., 2017a).
- Pantógrafo *down-top* integrado: O pantógrafo *de down-top* é a melhor opção quando o carregador deve ser integrado a redes de energia existentes. Nesse caso, todo o equipamento de carregamento é instalado no autocarro, incluindo o pantógrafo que entra em contato com a linha aérea. Este é um sistema económico e geralmente carrega diretamente da linha aérea, permitindo o carregamento rápido.

- Carregamento via conector (*Plug-ins*): Neste caso, um poste carregador é controlado por um operador. O carregamento começa automaticamente quando o sistema é conectado ao barramento e o usuário é identificado. O usuário monitora o estado de carga da bateria e pode interromper manualmente o processo de carregamento conforme sua conveniência. Este sistema utiliza postes de carregamento de alta potência, permitindo um posicionamento flexível e garantindo a máxima eficiência. O sistema pode ser projetado para carregamento lento ou rápido, mas geralmente é usado no final das linhas para carregamento noturno e, portanto, o carregamento lento é favorecido, pois o impacto do carregamento na rede é diminuído.

### 2.3.2. Abordagens ao problema do carregamento de autocarros elétricos

Os sistemas de carregamento são componentes cruciais para a adoção de VEs no transporte público, sendo a escolha da estratégia certa um desafio importante.

Dos tipos de carregamento mencionados acima surgem três tipos principais de carregamento: carregamento plug-in, troca de bateria e carregamento sem fio.

Estes tipos de carregamento poderão ser implementados em postos públicos de carregamento, devendo interagir com os sistemas elétricos, o mercado elétrico e os operadores de frotas, de forma a cumprir as respetivas condicionantes. As restrições do sistema de energia incluem limites de energia, tensão e frequência. O mercado de eletricidade fornece preços de eletricidade para otimizar os custos de carregamento ou, em alguns casos, licitações de eletricidade para participar de serviços auxiliares. As restrições dos operadores de frota incluem os horários dos AEs, que devem ser respeitados para garantir a satisfação dos passageiros.

Olhando em mais detalhe para estas 3 soluções é possível perceber o que torna cada uma diferente.

- Carregamento Plug-In

Começando pelo carregamento plug-in que corresponde ao método mais utilizado para carregar VEs, especialmente para os particulares. Para veículos pequenos, três níveis primários de carregamento são usados:

- Nível 1, ou carregamento lento, é o carregamento mais lento, o que não é recomendado para VEs de transporte público, devido às limitações de tempo.
- O nível 2 requer uma tomada de 240 V e é o método principal para instalações públicas e privadas.
- O nível 3 requer uma conexão CC e é a solução mais rápida para carregar uma bateria EV, mas requer uma grande quantidade de energia num curto período (Yilmaz & Krein, 2013).

Para os AEs, não é viável considerar níveis de carregamento lentos, pois a capacidade da bateria é alta e, portanto, o carregamento pode demorar muito e gerar atrasos, limitando os horários das viagens. O carregamento rápido parece a melhor opção de nível para AEs, considerando a conveniência do consumidor. No entanto, este tipo de carregamento apresenta problemas, como o sobreaquecimento das baterias.

- Sistema de Carregamento Wireless

Esta tecnologia vem suprimir alguns problemas comuns que podem surgir no carregamento de VEs:

- As condições ambientais (por exemplo, chuva, neve e temperaturas extremas) podem causar desconforto aos usuários quando conectam um VE manualmente na estação de carregamento.
- A falha dos cabos de alimentação e conectores pode causar problemas de segurança (risco de faísca elétrica e choque elétrico) (Y. Yang et al., 2018).

Assim, a principal vantagem desta tecnologia é oferecer a oportunidade de fazer carregamentos rápidos e frequentes enquanto o VE está em trânsito, em ruas com tráfego intenso, paragens de autocarro, estacionamentos e assim por diante. Esta possibilidade permite o *downsizing* da bateria, o que traz alguns benefícios:

- VEs mais leves;
- Redução de custo do VE e baterias reposicionadas;
- Poupança de energia devido à diminuição do peso da viatura;
- Redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

Há algumas conclusões interessantes em alguns estudos sobre este tipo de carregamento. Em (Bi et al., 2015), os autores concluíram que um Sistema de Carregamento *Wireless*, em comparação com um sistema de carregamento plug-in, consome 0,3% menos energia e emite 0,5% menos gases de efeito estufa. É assim uma tecnologia comprovada que fornece um sistema

de carregamento alternativo empolgante, que tem sido usado em vários projetos para autocarros urbanos movidos a bateria (Y. Yang et al., 2018).

A literatura mostra que existem três classificações principais de sistemas wireless que podem ser usadas para autocarros de transporte público: transferência de potência sem fio capacitiva, transferência de potência sem fio indutiva e transferência de potência indutiva ressonante (Z. Wang et al., 2016). As principais vantagens desta tecnologia incluem o menor consumo de energia e menos emissão de gases de efeito estufa, em comparação com o carregamento plug-in (Bi et al., 2015). Os desafios desta tecnologia incluem baixa eficiência de transferência de energia; altos custos de instalação, que são significativamente mais altos do que o carregamento plug-in e, ainda, a exposição humana à radiação de radiofrequência e campos magnéticos.

- Estação de Troca de Bateria (ETB)

Uma Estação de Troca de Bateria (ETB) é uma estação de VE onde se dá a troca de uma bateria descarregada por uma carregada (Sarker et al., 2015). Esta estratégia começou a ser adotada especialmente para o transporte público eletrificado.

O principal benefício das ETB é que funcionam de maneira semelhante a bombas de gasolina, uma vez que se pode ter imediatamente uma bateria carregada. Além disso, as ETB geralmente oferecem benefícios para as baterias de EV, pois a vida útil não é afetada quando não são carregadas em níveis de carregamento rápido.

Estas estações são compostas por (Adegbohun et al., 2019):

- Uma plataforma de veículo (elevador e equipamento de alinhamento);
- Elevadores de bateria, transportadores, *racks* de armazenamento e trilhos;
- Os componentes elétricos das ETB para carregar as baterias incluem um transformador de distribuição, carregadores, baterias e um módulo de controle de energia da bateria.

Uma das principais vantagens das ETB é que cria a possibilidade de um terceiro ser o proprietário das baterias e ser responsável por substituí-las por baterias totalmente carregadas, monitorando sua saúde e desativando as baterias quando não forem mais adequadas. Além disso, oferece benefícios de tempo aos usuários, evitando longos tempos de espera.

As principais limitações das ETB incluem a padronização das baterias de VEs, a aceitação do modelo e a estimativa confiável do estado de saúde da bateria.

## **Diferentes abordagens na inclusão de autocarros elétricos**

Vários estudos têm sido apresentados neste âmbito.

- Impacto dos VE nos níveis de consumo de eletricidade:

Em (Clement-Nyns et al., 2010), foi considerado o impacto de diferentes níveis de penetração de VEs plug-in num sistema de distribuição, e foi demonstrado que uma carga significativa de VE leva a queda de tensão e desvios de tensão. Uma integração de 30% de VE plug-in na rede levou a um desvio de tensão de 10,3% entre 18h00-21h00 no período de inverno. Em (Shafiee et al., 2013), foi demonstrado que o carregamento de VEs aumenta consideravelmente a carga de distribuição e, portanto, as perdas totais de energia. Além disso, o carregamento de VE



umenta a carga de pico diária. Os autores de (Pieltain Fernández et al., 2011) indicaram que os VEs geram custos de investimento substanciais em sistemas de distribuição, e que as perdas de energia podem chegar a 40% para uma penetração de 62%. Em (Lucas et al., 2015), foi exposto que o carregamento rápido de EV leva a problemas e falha em respeitar os limites do padrão IEEE. Em (Turker et al., 2012), foi proposto que as durações de vida dos transformadores de baixa tensão são reduzidas com uma alta penetração de VEs.

- Uso inteligente de eletricidade:

Diversos estudos têm abordado amplamente estratégias para a introdução massiva de VEs em sistemas de energia. Em (Pieltain Fernández et al., 2011) o carregamento inteligente de VEs, que permite que usuários de VEs e operadores de rede gerirem adequadamente os perfis de carregamento de VEs para obter benefícios técnicos e económicos, foi. As técnicas de carregamento inteligente incluem o conceito *Vehicle-to-Grid* (V2G), onde o VE não apenas carrega através da rede, mas fornece energia quando necessário, tornando-se um dispositivo de geração/armazenamento (Kempton & Tomić, 2005a),(Guille & Gross, 2009a).

Há também uma tentativa de relacionar Fontes de Energia Renováveis para a produção de eletricidade mais limpa e integrados em VEs, ressaltando o problema da incerteza e flutuação de geração de energia, bem como altos custos de instalação (Geng et al., 2017) ,(Verbruggen et al., 2010).

Os autores de (Richardson, 2013) reviram os impactos económicos, ambientais e de rede de VEs, e as interações entre VEs e Energias de Fontes Renováveis. Em (Haidar et al., 2014), foram estudados os principais desafios técnicos para a integração de VEs na rede. Os autores de (Mwasilu et al., 2014),(Habib et al., 2015),(Tan et al., 2016) centraram a sua revisão dos impactos, potenciais e limitações do V2G na integração de FER com VEs.

Em (Oda et al., 2018) ,(Arkin et al., 2019) há a tentativa de perceber qual a localização ideal das estações de carregamento de VE para atender às restrições técnicas da rede, considerando os tempos de espera.

Outra solução para mitigar os impactos dos VEs na rede considera a implementação de carregadores inteligentes. Esses carregadores geralmente são implementados fora do VE e são conectados por *plugue* CC. Eles possuem recursos avançados de comunicação para receber instruções do operador da rede, a fim de tomar ações para os requisitos da rede. Geralmente são bidirecionais para fornecer também eletricidade à rede, permitindo opções de controle para alimentadores de distribuição (Gallardo-Lozano et al., 2012) ,(Aziz et al., 2016) ,(Mehboob et al., 2019).

Em (García-Villalobos et al., 2014), foram apresentadas abordagens de precário inteligente, como estratégias, algoritmos, métodos e projetos. Os desafios e oportunidades para um estudo de caso lituano foram fornecidos em (Raslavičius et al., 2015). Em (Rahman et al., 2016), foram analisadas técnicas de otimização para infraestruturas de carregamento de VEs, como aspetos computacionais e algorítmicos.

- Estratégias no carregamento:

Em (Dai et al., 2014), foi proposta a previsão do carregamento de AEs através da estratégia de troca de baterias, baseada em modelagem estocástica. O modelo de carregamento utilizou dados estatísticos dos padrões de viagem dos AEs. Tempo de carregamento, distância percorrida e autonomia foram considerados variáveis cruciais para a previsão e foram modelados por meio

de métodos de previsão, como redes neurais, distribuições uniformes e o modelo gaussiano. Um método de Monte Carlo e um estimador de densidade foram usados para lidar com as incertezas.

Em (Mohamed et al., 2017) estudou-se a modelagem de autocarros elétricos numa rede de trânsito completa, com base num modelo de simulação em tempo real considerando as restrições de trânsito do mundo real de Belleville, Ontário, Canadá. Além disso, foi analisado o impacto na rede, como o impacto na vida útil dos transformadores e nos dispositivos de regulação e controlo de tensão. Os resultados indicaram que os carregamentos reduzem consideravelmente a vida útil do transformador e geram problemas de tensão.

Algumas abordagens concentraram-se em minimizar os custos de carregamento das estações de carregamento rápido. Em (Ding et al., 2015), foi apresentada uma metodologia que reduziu os custos totais de investimentos e custos de carregamento. Este trabalho considerou o valor do armazenamento de energia numa estação de carregamento rápido, demonstrando que o armazenamento de energia contribui para a redução de custos a longo prazo. O problema foi resolvido por uma formulação de programação não linear inteira mista, considerando os custos de capital do transformador, alimentador de distribuição e restrições de armazenamento de energia.

Em (Qin et al., 2016) foi proposta uma estratégia de carregamento para estações de carregamento rápido com base num processo de tomada de decisão, que considerava que os AEs só carregam quando os níveis da bateria estão abaixo de um limite definido, e eram carregados através de um carregador rápido. Esta estratégia foi simulada usando um estudo de caso de Tallahassee, Flórida, demonstrando redução de custos em comparação com casos sem estratégias de carregamento.

Em (H. Chen et al., 2016), foram propostas estratégias de carregamento coordenado em tempo real para estações de carregamento rápido. O objetivo foi minimizar os custos associados ao consumo de energia, considerando os preços diários do Tempo de Uso. Este trabalho foi complementado por (H. Chen et al., 2018), onde foi incluído um sistema adicional de armazenamento de energia, e a formulação do problema foi mais completa. Foi utilizado um método heurístico, avaliando o controlo do plug-in em AEs. O método foi simulado em Chongqing, China, validando a importância do armazenamento de energia em estações de carregamento de AE.

A minimização dos custos das ETB de AE também tem sido considerada por alguns autores. Em (Gao et al., 2018), o custo operacional de um sistema de troca de baterias foi minimizado, através da previsão da chegada de diferentes viaturas com base, numa avaliação que teve por base dados reais. Os custos associados ao carregamento foram otimizados através da utilização de um Algoritmo Genético e considerando preços de Tempo de Uso. O caso de estudo foi aplicado em Baoding, província de Hebei, China, tendo como resultado uma melhoria nos lucros em condições normais.

Com foco nas estações de carregamento, é essencial estudar a sua alocação. Neste aspeto, a implantação de estações de carregamento AE foi considerada em (Sebastiani et al., 2016). Uma otimização biobjetiva foi usada para minimizar tanto o número de estações de carregamento quanto o tempo de paragem do AE. Para isso, com base numa simulação de eventos discretos, avaliou-se o consumo de energia de autocarros elétricos, levando em consideração as forças de carga e atrito, além de diferentes dados de um caso de estudo em Curitiba, Brasil, como número de passageiros, autocarros, velocidade, distâncias, e perfis de elevação de rota.

Em (Y. Wang et al., 2017) estudou-se o planeamento, localização e dimensionamento de estações de carregamento de AE. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura de marcação de carregamento, que minimizou os custos operacionais anuais do sistema, incluindo um custo de espera recarregamento. Este problema foi aplicado num caso de estudo na cidade de Davis, Califórnia, EUA. Além disso, foi demonstrado que os AEs são mais económicos, comparados aos autocarros a diesel. Na mesma linha, em (Liu et al., 2018), foi proposta a localização e dimensionamento de estações de carregamento rápido, considerando a incerteza do consumo de energia. O modelo minimizou os custos do sistema sujeitos a restrições elétricas e de autocarros, tendo sido aplicado ao sistema de autocarros de Salt Lake City (EUA).

Em (Bak et al., 2018) examinou-se a implementação de três diferentes sistemas de carregamento: carregamento sem fio, troca de bateria e carregamento plug-in. A análise foi realizada na cidade de Daegu, Coreia do Sul. Os resultados mostraram que investir em estações de troca de baterias foi mais benéfico do que as outras opções para rotas simples e compostas. Da mesma forma, os três diferentes custos do sistema de fornecimento de energia foram analisados em (Z. Chen et al., 2018), mas considerando apenas os custos de investimento. O objetivo era procurar modelos de projeto ótimos minimizando custos.

De maneira a minimizar os custos de investimento e operação, em (An et al., 2020) um estudo sobre a localização de ETB foi feito, tendo sido aplicado em Melbourne, Austrália.

Outra abordagem interessante considera o escalonamento de um sistema de AE com carregamento wireless (C. Yang et al., 2018). No estudo, foi desenvolvida uma metodologia otimizada que minimiza os custos de energia elétrica do sistema, considerando as características do sistema de carregamento wireless. O problema foi resolvido por otimização convexa e foi demonstrado no sistema *Bus Rapid Transit de Guangzhou* (China).

#### 2.4. Custos de Investimento

O custo total de propriedade (CTP) foi identificado como uma das principais barreiras para a implementação de autocarros elétricos (Lajunen et al., 2014).

O CTP inclui o preço de fabrico e os custos de manutenção, operação, distribuição de energia, infraestrutura, emissão, seguros, e fim de vida (FCH-JU et al., 2012). O CTP foi calculado na literatura com base em dados operacionais, ou na análise do ciclo de vida modelos [McKenzie]. Embora tenham sido feitos vários esforços para calcular o CTP dos autocarros elétricos, é evidente na literatura que existe muita incerteza na estimativa do mesmo (Lajunen et al., 2014), uma vez que o cálculo é altamente dependente da operação e de aspetos logísticos. Preciso ter em conta que o preço do combustível (gasóleo, eletricidade e hidrogénio) desempenha também um papel significativo nas estimativas do CTP (Conti et al., 2015).

Olhando para o preço de fabrico, é notável que todos os autocarros elétricos são mais caros do que a sua contraparte diesel. O custo adicional é atribuível ao custo dos componentes elétricos (ou seja, bateria, motor elétrico, e sistema auxiliar) (Feng et al., 2013). É aparente que não há variação significativa no preço entre paralelos e autocarros híbridos em série.

Em termos de custo operacional, os autocarros elétricos desempenham melhor do que o autocarro a gasóleo, sendo que proporcionam uma redução média de 80% em custos de

funcionamento em relação aos autocarros movidos a diesel. Como ponto de comparação, acrescentar que autocarros híbridos conseguem reduzir custo de operação numa média de 8-15%.

No entanto, em termos de custo das infraestruturas, esta opção torna-se claramente a mais cara, uma vez que toda a infraestrutura necessária teria de ser criada, com criação de uma maior densidade de pontos de carregamento ao longo dos percursos. As estimativas sugerem um ponto de carga para cada 10-20 km (Zivanovic Z et al., 2012).

A Empresa *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH-JU et al., 2012) desenvolveu Estimativas de CTP baseadas em dados operacionais de autocarros elétricos através Europa. As estimativas consideraram uma vasta gama de indicadores que incluem os custos de aquisição, financiamento, operação, infraestruturas e coimas associadas a emissões. As suas conclusões, baseadas em 60.000 km de quilometragem anual e um autocarro com 12 anos de vida útil, mostram que autocarros elétricos têm ainda um custo de CTP elevado comparando com autocarros híbridos ou movidos a diesel.

No entanto, outros estudos têm argumentado que o CTP de autocarros elétricos é muito sensível, não só ao custo relacionado com componentes elétricos (ou seja, preço da bateria, auxiliar sistema), mas também ao nível de utilização do serviço. Vários estudos têm ecoado que sob cenários de utilização elevada, e mesmo moderada, os autocarros elétricos podem ser economicamente competitivos escolha em comparação com autocarros a gasóleo e a GNC (Feng et al., 2012)

Ainda assim, a mesma empresa mencionada acima (FCH-JU et al., 2012) relata que o CTP para alguns autocarros elétricos irá baixar significativamente até 2030 com uma média de 30-50% para alguns tipos de veículos. Alerta ainda que CTP para híbridos e os autocarros a gasóleo também deverão descer, em média, 1-5% em 2030, conforme destacado na Fig. 1.

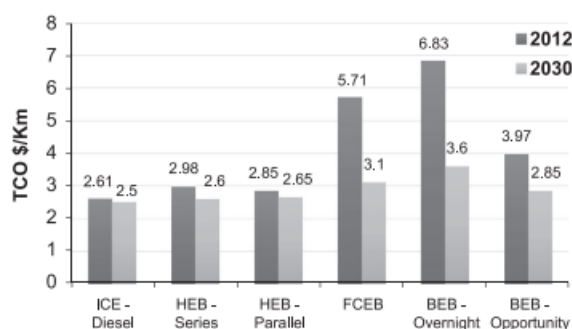


Figura 1 - Custo Total de Propriedade de autocarros elétricos 2012/2030. Fonte: FCH-JU et al., 2012

Para além disto, é preciso ter em conta que o facto de a autonomia do autocarro elétrico ser mais curta leva ao possível aumento de veículos necessários numa frota para o desempenho da mesma operação comparando com autocarros a diesel, o que por sua vez leva ao maior número de tripulantes necessários, o que traz mais custos na operação.

### 3. Contextualização do problema

Esta secção inclui a apresentação da empresa para contextualizar o projeto apresentado, que será também aqui detalhado. Será também apresentada a metodologia adotada no projeto.

### 3.1. Apresentação da empresa

Como dito anteriormente, a OPT, Optimização e Planeamento de Transportes, S.A., é uma empresa dedicada à tecnologia e transportes com sede no Porto. Surgiu em 1992 como uma spinoff desenvolvida pela FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e FCUL, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Com o passar dos anos, a OPT acabou por desenvolver parcerias também com o INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial que tem um papel importante na passagem de conhecimento académico de produtos tecnológicos e aplica processos que permitem que soluções inovadoras cheguem ao mercado. Esta parceria é baseada na partilha de projetos e recursos nomeadamente na área de engenharia computacional.

A OPT é uma empresa que se dedica à consultoria na área da mobilidade dedicando-se a resolver problemas de nicho nessa área. A empresa conta com cerca de 30 colaboradores, sendo grande parte dos mesmos informáticos ou matemáticos.

Como referido anteriormente, a OPT desenvolve soluções em três áreas de trabalho, gestão de operações, informação ao público e assessoria na mobilidade. O setor da gestão de operações trabalha diretamente com operadores de transporte público; informação ao público trabalha diretamente com operadoras de transporte ou entidades institucionais como municípios; estudos em assessoria na mobilidade são feitos para entidades institucionais e para companhias privadas. A OPT detém uma vaga lista de clientes que inclui a Carris, STCP, Metro do Porto, Horários do Funchal, Transdev, Barraqueiro Group, CP – Comboios de Portugal e Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra (SMTUC).

A OPT é ainda uma pioneira na inovação na otimização de planeamento e gestão na área dos transportes e ainda na geração automática de informação ao público em Portugal. A empresa continua a crescer e expandiu a sua oferta com consultoria para o planeamento operacional nos transportes. No mesmo ponto de inovação e com a demanda do mercado para a busca de soluções mais sustentáveis, a OPT desenvolveu serviço de consultoria nas áreas da acessibilidade e mobilidade baseando-se no paradigma atual. Assim, a OPT continua-se a manter no topo da inovação propondo soluções tecnológicas e lançando-as no mercado.

#### **Gestão de Operações**

- **GIST**

O GIST (Gestão Integrada de Sistemas de Transportes) é um software com diversos módulos para o planeamento operacional em transportes públicos, o que permite que utilizadores do mesmo consigam gerir a sua frota através de uma rede. Permite ainda a geração de horários de veículos e tripulante incluindo os seus horários diários depois de serem otimizados. Usando algoritmos com base heurística complexos, o GIST apresenta ao operador uma série de alternativas através de uma interface gráfica desenhada para facilitar a sua utilização. O software gere a informação gerada pela rede de transportes numa forma otimizada ao combinar rede e dados das viagens. A versão completa do GIST consiste numa série de módulos, cada um com a sua função específica que assiste o utilizador durante o processo de planeamento:

- Rede: módulo responsável por caracterizar a rede, definindo nós, segmentos, altura do ano e tipo de veículos;
- Mega linhas: módulo que define a oferta tendo em conta as rotas disponíveis pela companhia e horários e frequências respetivas;

- Viagens e veículos: aqui, blocos são criados associando veículos a viagens de acordo com o definido pela oferta e considerando o horário e frequência;
- Serviços: este módulo associa tripulantes a blocos de maneira a produzir uma solução que vai ser avaliada segundo a sua eficiência;
- Escalamento: este módulo permite a gestão dos tripulantes disponíveis e é onde há a atribuição de serviços aos mesmos.

A veia de inovação do GIST é devido à sua interface bastante interativa, a facilidade para a parametrização, a automatização de processos de criação de horários e a gestão integrada de dados que, a qualquer momento, oferece informação atualizada e consistente para o utilizador ou para o público em geral. Permite ainda a provisão de informação de rotas e horários. Nas imagens seguintes podemos ver a interface do software, de dois horários diferentes, um relativamente simples, onde apenas uma viatura é necessária e são conjugados dois serviços de tripulantes, e outro onde o número de viagens e viaturas necessárias é bem maior.

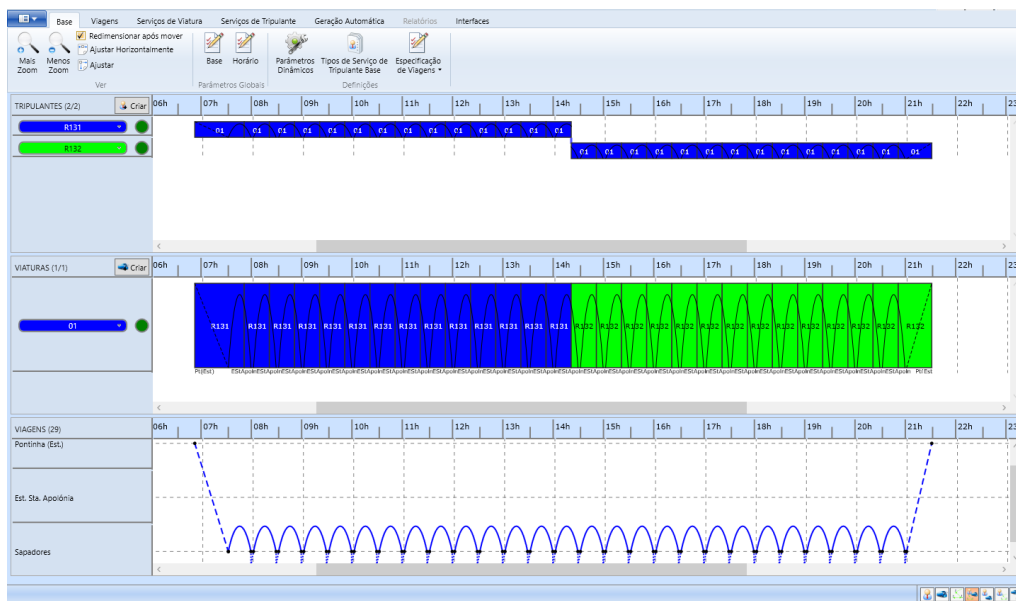


Figura 2 - Print Interface GIST (a)

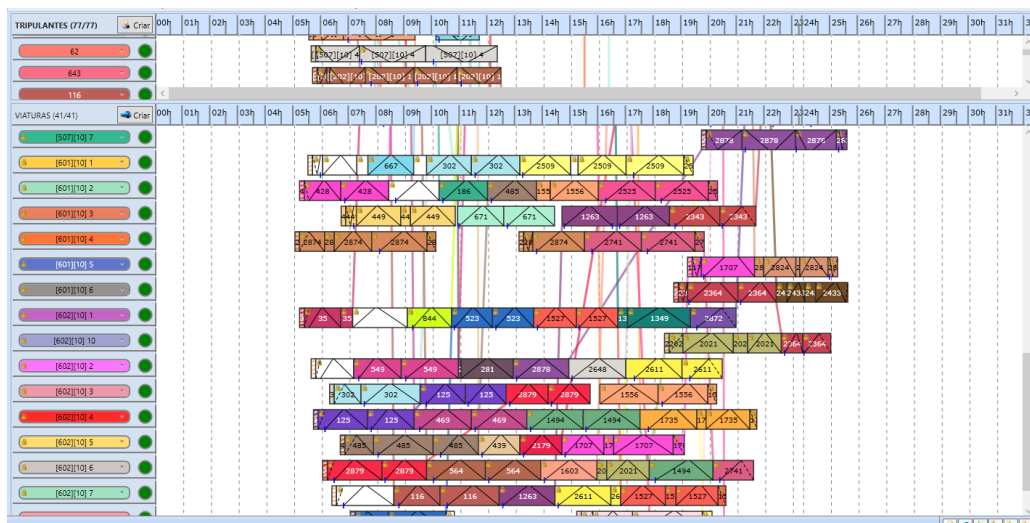


Figura 3 - Print Interface GIST (b)

- **GeoRef-Map**

No acompanhamento do GIST, o GeoRef-Map foi lançado. Este produto é o responsável pela georeferência na rede de transportes dando informação atualizada aos operadores da localização exata das suas rotas e paragens.

- **MOBUS e HeyBus**

Os serviços da OPT incluem o monitoramento contínuo dos seus clientes, especialmente para manutenção, atualização e treino. Assim, há a criação de um ambiente de cocriação onde as funcionalidades dos produtos, apoiadas por avanços tecnológicos, encontram as necessidades e requerimentos dos clientes. Um dos mais recentes produtos é o MOBUS, uma plataforma integrada à resposta para a demanda de transporte. É então um sistema de mobilidade que se foca na inclusão de território através do aumento de cobertura dos serviços de transporte públicos como uma alternativa ao transporte individual em zonas de pouca oferta ou fora de horas de pico. Esta solução inclui os componentes necessários para gerir e operar como o sistema do operador, que define a rede, paragens e reúne dados estatísticos relevantes, o utilizador da app, call center (para passageiros que não tenham smartphome), app para tripulantes (estabelecendo pontos de recolha e vista dos perfis dos passageiros) e ainda planeamento de rotas e custos das ferramentas de otimização.

- **Informação ao Público**

A partir de 2007 a OPT apostou numa nova área, a de Informação ao Público e, a partir de uma parceria com a empresa londrina FWT, a OPT tem vindo a desenvolver sistemas inovadores que automatizem a produção de informação ao público nas paragens (impressa ou na internet), destacando-se os produtos InfoPub e SpiderMaps.

- **Consultoria em Mobilidade Urbana**

A crescente necessidade de um serviço de transportes públicos capaz de servir as necessidades da sociedade que vive em zonas urbanas fez com que a OPT investisse num departamento dedicado à mobilidade e consultoria em transportes cujos projeto refletem a crescente necessidade de conceber serviços de mobilidade flexíveis em áreas de baixa densidade populacional, realinhamento e reabilitação de infraestruturas tendo em conta o equilíbrio energético e ambiental, com a promoção de redes de percursos pedonais e ciclovias e criação de planos de mobilidade para municípios e melhoria da qualidade da informação e comunicação ao público em tempo real. Assim, a OPT participa em estudos de análise em processos de planeamento para dar suporte à decisão de municípios nesta área.

No que diz respeito ao transporte coletivo, a OPT desenvolve projetos de redesenho e reestruturação das redes por meio de metodologia especial de levantamento e modelação fatorial, nomeadamente ao nível de sistemas de transporte, analisando ainda mais o desempenho das ofertas existentes.

Importante ressaltar o papel do monitoramento da satisfação do cliente, pois este representa uma ferramenta fundamental para a evolução de sistemas de transporte público e na mobilidade urbana em geral, e deve ser realizada periodicamente pelas entidades responsáveis. A qualidade do serviço prestado depende de um conjunto de requisitos/necessidades que

devem ser notados e, se possível, os próprios serviços devem ser adaptados às especificações exigidas dentro do quadro do economicamente viável.

A OPT também desenvolve estudos de tráfego para cenários comerciais, industriais ou residenciais para avaliar o impacto de projetos por meio de modelagem por geração induzida e microsimulação, analisa o licenciamento de processos com o desenho de medidas e soluções urbanas para mitigar os mesmos impactos estimados. Estes impactos baseiam-se no desenho urbano de acessos, vias e estacionamentos. O redesenho do espaço urbano em novas configurações considera a introdução de modos suaves devido à sua crescente importância.

### 3.2. Projeto

O projeto surge no âmbito da inovação nas áreas de transportes e mobilidade e visa responder a duas perguntas, o que acontece se a totalidade dos veículos usados numa operação de transporte público forem veículos elétricos e qual o impacto desta implementação, quer a nível ambiental quer a nível financeiro.

O grande objetivo final é o de saber se numa empresa de mobilidade urbana, que tradicionalmente recorre a veículos que se movem com combustíveis fósseis, será possível a transição para o elétrico, percebendo quais os custos associados a essa passagem, e tendo em conta a preocupação das empresas investimento de infraestruturas, frota, manutenção e não esquecendo a operação em si.

Trata-se de uma questão importante para a OPT, pois trabalha diretamente com empresas que estão a passar por uma fase de remodelação de frota e processos na operação que envolvem a integração de, entre outro tipo de veículos, veículos elétricos.

Importante entender o que este novo panorama pode trazer e quais as mudanças esperadas com a sua integração, perceber as diferenças entre veículos movidos por combustão interna e elétricos e o que resulta dessas diferenças em questões como a autonomia, possibilidade de rotas a serem feitas, número de viaturas necessárias e, conseqüentemente, número de tripulantes necessários para fazer a mesma operação, não esquecendo a influência destes fatores no investimento necessário para a adoção desta estratégia.

O tema da sustentabilidade é um dos temas em voga na discussão pública desde o início da segunda década do século XXI, e o setor da mobilidade tem uma responsabilidade acrescida no que toca ao desenvolvimento de novas medidas que permitam alcançar taxas de emissão mais baixas. Um dos objetivos deste projeto passa também pela medição de emissões CO<sub>2</sub> antes e depois da adoção de uma frota 100% elétrica, e medir esse impacto no meio ambiente.

De maneira a complementar toda a informação desposta, o projeto visa a realização de um estudo da introdução de veículos elétricos na cidade do Porto, utilizando uma frota totalmente elétrica, onde custos de frota, manutenção, e de operação (incluindo custos relacionados com novos serviços de viatura e tripulantes), serão tidos em conta. Para além disso, será analisado neste caso de estudo, que estratégias devem ser tomadas tendo em conta as limitações de veículos elétricos, principalmente pela autonomia limitada, utilizando como ferramenta de simulação e de apoio à decisão o software desenvolvido pela empresa, GIST.



### 3.3. Metodologia do Projeto

O projeto que decorreu ao longo de 8 meses é, assim, dividido em quatro fases:

A primeira fase tem em conta a aprendizagem do software de apoio à decisão GIST, criado e mantido pela OPT, com objetivo de dominar a criação de um plano operacional, incluindo atribuição de viagens a serviços de viaturas e serviços de tripulantes. Nesta fase tem se em conta também a aprendizagem de o que é um planeamento operacional, qual o objetivo da utilização do software, quais as limitações, de que maneira podemos otimizar uma solução através de manipulação de serviços e/ou viagens, etc.

A segunda fase baseia-se na compreensão das mudanças necessárias e implicações na adoção de uma frota elétrica. Para isso foi necessária pesquisa de bibliografia e consequente análise da mesma, com o objetivo de perceber o estado atual da matéria em análise, como o tipo de veículos usados no transporte público, comparação entre esses mesmos tipos de veículos, tipos de baterias usadas em autocarros elétricos, possíveis formas de carregamento, e investigação de casos de estudo realizado noutras cidades, com o intuito de perceber qual a melhor estratégia a ser adotada no caso de estudo apresentado.

A terceira fase consistiu na definição e realização do caso de estudo, usando o GIST como meio de simulação e a bibliografia encontrada como base e tendo em conta as novas parametrizações necessárias associadas à introdução de um novo tipo de veículos, tendo especial atenção à autonomia de veículos elétricos.

Na quarta fase do projeto, é feito um estudo com comparação de resultados em termos da operação. São comparados parâmetros como número de tripulantes necessários, número de veículos necessários, custo associados a estes números, número de quilómetros total e em vazio, número de tempo em operação total e em vazio, tempo em paragem, e implicações destes parâmetros no resultado final do planeamento. Nesta fase é realizada ainda a comparação de emissões CO<sub>2</sub>.

## 4. Desenvolvimento

### 4.1. Análise da situação atual

De maneira a perceber o atual funcionamento da operação da STCP é importante perceber primeiro o funcionamento do software GIST, que se baseia no problema da criação de horários para o transporte público. O software é dividido em três segmentos, rede, planeamento e escalamento, sendo que para o planeamento operacional apenas seja necessário a análise de rede e planeamento.

O módulo rede tem como função a criação e gestão de informação sobre a rede de transportes. Esta informação irá ser usada depois como base nas tarefas de planeamento e informação ao público, assim como gestão dos restantes módulos do sistema GIST.

É no módulo de rede que se pode definir:

- Nós: que correspondem aos pontos mais importantes da rede, como por exemplo, estações de recolha das viaturas, terminos das linhas e pontos de rendição de motoristas;
- Segmentos e as suas durações por período do dia;

- Percursos e Linhas da rede de planeamento, bem como as “Megalinhas” que servem de suporte à criação de horários de viagens e serviços de motoristas e viaturas.

É também neste módulo que a definição e edição da rede física, que inclui paragens, trajetos e rotas) é feita. Permite também importar mapas em diversos formatos.

O planeamento corresponde ao módulo central do GIST. Aborda o processo do planeamento operacional dos recursos de uma empresa de transporte de passageiros. Tem por base a informação disponibilizada pela Rede. É neste módulo que a oferta de horários ao público e a atribuição de serviços de viatura e tripulantes é feita.

As principais funcionalidades do módulo de planeamento podem ser enunciadas da seguinte forma:

- Definição da oferta (viagens), com possibilidade da utilização de mecanismos gráficos avançados que garantem o cumprimento de regras de coerência;
- Manipulação Integrada de Informação, onde a estrutura de dados utilizada por este módulo permite a identificação das ligações e dependências entre viagens, tempos de preparação, cumprimento da legislação laboral aplicada aos tripulantes, tempos de deslocação, etc.;
- Algoritmos de Otimização, que tiveram fruto da extensa experiência da empresa nesta área. Algoritmos cuja função passa pela otimização dos recursos necessários ao cumprimento da oferta definida são disponibilizados. De notar ainda que as soluções fornecidas podem ser manipuladas total ou parcialmente estando acessíveis funcionalidades que previnem o incumprimento inadvertido das regras definidas;
- Parametriação Dinâmica, com fórmulas de cálculo e de validação dos parâmetros dos serviços estão acessíveis ao utilizador para que este as possa alterar de acordo com as regras específicas da sua empresa;
- Gestão de versões, que para além de possibilitar a definição de oferta para dias excecionais (por exemplo dias de feira) sem perder as definições mais genéricas, permite em conjunto com a Parametriação Dinâmica a utilização deste software na identificação das consequências da introdução de alterações nas regras da empresa sem pôr em causa a validade do planeamento operacional que está em vigor.

De forma a resolver o problema em estudo é necessário que as soluções geradas obedeçam a um conjunto de restrições. Estas podem ser agrupadas em três categorias distintas, sendo elas respetivamente: restrições de viagem, restrições de viatura e restrições de serviço de tripulante.

Para trabalhar as viagens, estas são agrupadas em blocos e têm de obedecer às restrições de viagem que são compostas pelos seguintes parâmetros:

1. Estação de recolha – Deve ser possível definir se uma viagem tem de começar numa estação de recolha, terminar numa estação de recolha, nenhuma das opções ou então ambas;
2. Ponto de rendição - O nó de início e fim de cada bloco deve estar definido como ponto de rendição;
3. Nó de início – O nó de início de uma viagem deve coincidir com o nó de fim da viagem anterior, excetuando a primeira viagem do bloco.

Um serviço de viatura pode ser composto por várias viagens, sendo assim, surge a necessidade de encadear viagens. Este processo pode ser realizado de três modos diferentes:

1. Com paragem num mesmo nó. – Quando a hora de início da segunda viagem é maior ou igual à hora de fim da primeira viagem com o acréscimo do tempo de paragem definido na viagem;
2. Com atraso na segunda viagem. – Quando não obedece à condição anterior;
3. Com paragem numa estação de recolha. – Quando o tempo de espera entre o fim da primeira viagem e o início da segunda viagem é superior ao tempo mínimo de paragem na estação de recolha e inferior ao tempo máximo de paragem na estação de recolha.

Para além disso, é também admissível a utilização de uma viagem em vazio para a ligação destas duas viagens. Contudo, de forma que a viatura seja possível de ser utilizada numa determinada viagem é necessário que a viagem suporte o tipo de viatura. Outra restrição associada ao serviço de viatura é que o mesmo tem de começar e terminar sempre numa estação de recolha. Em caso de existir mais do que uma estação de recolha deve ser validada que a estação escolhida para termino do serviço de viatura não exceda a capacidade máxima definida para o tipo de viatura correspondente.

Por fim, um serviço de viatura pode ter também associado um número máximo de mudança de tripulante. As restrições de tripulante são caracterizadas pelos seguintes aspetos:

1. Rendições – As rendições, início de serviço e fim de serviço devem ocorrer em pontos de rendição;
2. Deslocações – Quando o local de início de uma viagem não é comum ao local de fim da viagem anterior, há necessidade de o tripulante se deslocar. Este tempo de deslocação pode ser configurado como uma das seguintes opções:
  - (a) Não ser contabilizado;
  - (b) Adicionar ao fim da etapa anterior;
  - (c) Adicionar ao início da etapa seguinte;
  - (d) Adicionar o tempo apenas ao horário de tripulante e não a nenhuma etapa.
3. Etapas – O número máximo de etapas a realizar pelo tripulante;
4. Refeições – Definição de tempo mínimo e máximo para almoço e jantar quando necessário durante o horário de trabalho;
5. Pequenas interrupções – Definição de número máximo de pequenas interrupções, tempo mínimo e tempo máximo para cada;
6. Mudanças de viatura – Número máximo de mudanças de viatura permitido;
7. Início/Fim de serviço – Definição de horários onde não é permitido iniciar um serviço, definição de horário onde não é permitido terminar um serviço e possibilitar restringir a que o serviço inicie e termine no mesmo local;

8. Amplitude – Definição do máximo entre a hora de início de serviço e hora de fim;
9. Tempo total de trabalho – Definição de intervalo de tempo para o tempo total de trabalho, diferente da amplitude, pois, não contabiliza o tempo de pausas. Para além deste intervalo são definidos também mais três intervalos de tempo, podendo estes ter custo por hora diferente, eles são respetivamente:
  - (a) Tempo de trabalho normal;
  - (b) Tempo de trabalho extra;
  - (c) Tempo de trabalho noturno.
10. Condução – Definição do tempo máximo de condução diária. (Teixeira, 2020)

#### 4.1.1.Revisão da Literatura – escolha da tecnologia para carregamento de baterias

Para a escolha da técnica de carregamento teve-se em conta a revisão de literatura e pesquisa feita, baseando-se sobretudo nas conclusões tiradas por Zhibin Chen, Yafeng Yin e Ziqi Song, no artigo “*A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations*”, datado de 2018, onde os autores fazem uma comparação de custos na aplicação de várias tecnologias de carregamento de viaturas elétricas direcionado ao transporte público e autocarros.

Yafeng Yin é professor de Engenharia Industrial e de Operações na Universidade de Michigan, sendo “*Interim Department Chair*” do CEE, Departamento de Engenharia Civil e Ambiente da mesma Universidade. Como habilitações académicas possui duas licenciaturas, em Engenharia Estrutural e Engenharia Ambiental, ambas pela Universidade de Tsinghua, Mestrado em Engenharia Civil também pela Universidade de Tsinghua, e, finalmente, um doutoramento em Engenharia Civil, pela Universidade de Tokyo. Tem como prémios relevantes:

- *Ryuichi Kitamura Award*, no setor de Métodos para Análise de Viagens, atribuído pelo Conselho de Investigação de Transporte, em 2016;
- Prémio de Liderança de Excelência, atribuído pela Associação Chinesa de Transportes Ultramarinos, em 2018;
- Prémio Fundação Monroe-Brown por Ensino Excecional, atribuído pela Universidade de Michigan, no ano de 2021;
- Prémio de Parceria de Corpo Docente; atribuído pela Universidade de Michigan, no ano de 2021.

Conta ainda com dezenas de publicações no setor dos transportes.

Ziqi Song é professor de Engenharia Civil e Ambiental na Universidade de Utah. Como habilitações académicas possui uma licenciatura em Engenharia dos Transportes, pela Universidade de Southeast, em 2003; é mestre em Engenharia dos Transportes pela Universidade de Hong Kong, em 2006; tem mestrado em Investigação de Operações, pela Universidade da Florida, em 2011; e, finalmente, é doutorado em Engenharia dos Transportes, também pela Universidade de Florida, em 2011. Como prémios importantes destacam-se:

- Prémio de investigador do ano; atribuído pela Universidade de Utah, no ano de 2018;

- Prémio de Mentor de pós-graduação do ano; atribuído pela Universidade de Utah, nos anos de 2019 e 2020.

Conta também com dezenas de artigos públicos, assim como contribuições para livros na área dos Transportes.

Zhibin Chen está atualmente afiliado à Universidade de Shanghai, no departamento de Engenharia de Ciência da Computação, *Data Science* e Inteligência Artificial. Como habilitações académicas possui uma licenciatura em Engenharia dos Transportes pela Universidade de Sun Yat-sen, em 2012; possui mestrado em Engenharia dos Transportes pela Universidade da Florida em 2015 e doutoramento na mesma área e universidade no ano de 2017; fez ainda investigação na área dos transportes, numa pós-graduação pela Universidade de Michigan nos anos de 2018 e 2019. O seu grande objetivo com o seu trabalho de investigação é o de identificar, desenvolver e implementar novas tecnologias para atingir um sistema de transportes mais seguro, eficiente e amigo do ambiente.

#### 4.1.1. Apresentação do artigo “*A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations*”

O grande objetivo em questão é o de efetuar uma análise e comparação de custos na aplicação de várias tecnologias de carregamento de viaturas elétricas direcionado ao transporte público e com especial ênfase no que toca ao papel dos autocarros no mesmo.

Para isso, fazem numa primeira fase a comparação de custos na aplicação das tecnologias de estação de carregamento, faixas de carregamento e estações de troca de bateria. Numa primeira análise, apresentam um conjunto de resultados que inclui custo total da aplicação, tamanho de bateria, tamanho da frota necessária e delays de carregamento.

Depois disto, é feita uma análise sensitiva tendo em conta a frequência do serviço, distância de circulação, número de horas para a operação e velocidade, calculando o impacto destes fatores nos custos.

Para esta pesquisa, tiveram como base algumas considerações.

O objetivo foi então o de conduzir uma análise de custo-competitividade para diferentes métodos de carregamento em viaturas elétricas para o transporte público. Para manter não aumentar a dificuldade no tratamento de dados considerou-se apenas um loop único de uma megalinha de autocarro. A linha considerada era uma agregação de várias linhas de autocarro no mesmo sistema de trânsito. Para além disso, como os ciclos de vida de várias instalações de carregamento, autocarro e baterias são ambíguos, foram assumidos valores bastante conservativos como igual ao período de garantia da bateria 12 anos para BYD ebus (Zart et al., 2017) e 12 anos para a bateria do autocarro elétrico Proterra (Eudy et al., 2016).

Para além destas, as seguintes suposições foram tidas em conta:

- i. A estação de carregamento ou de troca de baterias, é implantada apenas no terminal de autocarro enquanto as faixas de carregamento são distribuídas uniformemente ao longo da linha de autocarro;

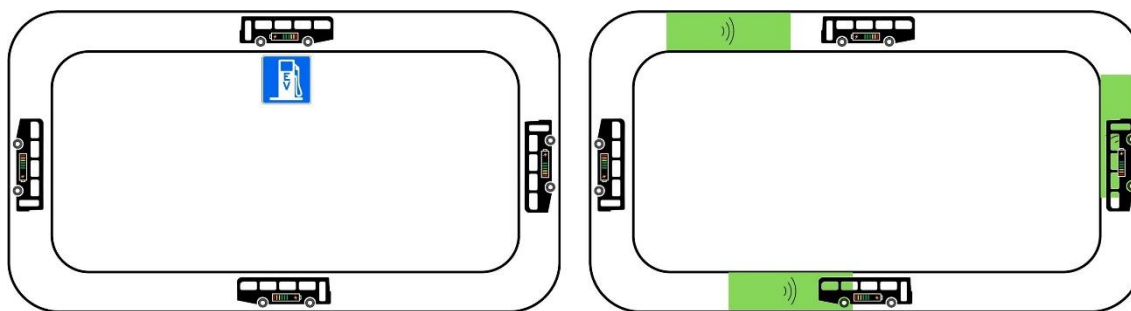


Figura 4 - Linha de autocarros com estações de carregamento (esquerda) e faixas de carregamento (direita) fonte: "A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations" de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

- ii. Os motoristas optam sempre por recarregar totalmente a bateria quando acessam um ponto de carregamento;
- iii. No cenário de instalação de uma faixa de carregamento, os autocarros são totalmente recarregados sempre que passam no terminal rodoviário, onde não há uma estação de carregamento nem uma estação de troca de baterias;
- iv. Todos os autocarros são idênticos e operados pela mesma empresa de transporte público;
- v. Todas as infraestruturas de carregamento são construídas e operadas pela mesma empresa de transporte público;
- vi. A velocidade média de operação, considerando os tempos de permanência nas paragens de autocarro, é constante ao longo da linha;
- vii. O peso total do motorista, passageiros e autocarro é constante ao longo da linha de autocarro;
- viii. Os autocarros não precisam desacelerar para recarregar nas faixas de carregamento;
- ix. O atraso no acesso e na saída de uma estação de carregamento ou troca é constante;
- x. Para recarregar as baterias armazenadas na estação de troca, vários carregadores são tomados em conta na estação de troca de baterias;
- xi. Os autocarros funcionam continuamente quando não estão em carregamento numa estação de carregamento ou em processo de troca de bateria numa estação de troca de baterias;
- xii. A empresa de transporte público visa minimizar os custos totais de capital tanto para a construção de infraestrutura quanto para a frota;
- xiii. A configuração da infraestrutura de carregamento deve garantir o atendimento pontual das viaturas elétricas.

É apresentada uma análise empírica para investigar a competitividade de custos de diferentes tipos de infraestrutura com base nos correspondentes planos de conceção ótima. A tabela x mostra os valores por defeito dos parâmetros adotados nesta secção.

O caso de estudo apresentado baseia-se na Metro Orange Line, um corredor de trânsito rápido (BRT) de autocarros em Los Angeles.

O comprimento (ou seja,  $l$ ) de ida e volta é de 35,2 mi, equivalente a 56,65 km. A frequência de serviço de hora de ponta (ou seja,  $f$ ) é de 16 veh/h; a velocidade média (ou seja,  $v$ ) ao longo do corredor é de 19,9 mph; e o número de horas de funcionamento (ou seja,  $T$ ) é de 22,2 h (ITDP, 2017), aproximadamente 31 km/h.

Tabela 1 -Definições de parâmetros e valores default. Fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

Parameter definitions and default values.		
Parameter	Description	Value
$f$	Service frequency	16 veh/h
$T$	Operating hours	22.2 h
$l$	Circulation length	35.2 mi
$v$	Average speed	19.9 mph
$\alpha$	Recharging efficiency for charging and swapping stations	0.9
	Recharging efficiency for charging lanes	0.85
$\theta$	State of charge range (SOCR)	0.6
$P$	Electric power of charging and swapping station	120 kW
$P_l$	Electric power of charging lane	80 kW
$A_0$	Fixed construction area for each charging station	2,000 ft <sup>2</sup>
$a_0$	Construction area required for one charger	900 ft <sup>2</sup>
$C_a$	Unit construction cost	\$104/ft <sup>2</sup>
$C_s$	Installation cost per unit of charging power	\$444/kW
$C_e$	Unit manufacturing cost for battery	\$570/kWh
$C_b$	Unit manufacturing cost for bus (excluding battery)	\$315, 320/veh
$C_f$	Construction cost for battery swapping system without chargers	\$562, 400
$A_l$	Construction cost for building one mile of charging lane	\$321, 800/mi
$B_l$	Inverter cost per unit of charging power	\$250/kW
$C_l$	Fixed cost of constructing power transmitter	\$20,000

Os valores para os custos da infraestrutura necessários para diferentes tecnologias são obviamente distintos. São apresentados a seguir os diferentes custos para os diferentes tipos de tecnologias.

- Estação de carregamento:

Para a construção de uma estação de carregamento tomaram em conta os dados de Nie e Ghamami (Nie et al., 2013). A área da infraestrutura foi fixada nos 2000 ft<sup>2</sup>, equivalente a 185,8 m<sup>2</sup>, e o custo de construção nos \$104/ft<sup>2</sup>, aproximadamente 1.058,5€/m<sup>2</sup>.

A área variável de construção necessária para um carregador, concebido apenas para automóveis de passageiros, é suposto ser de 300 ft<sup>2</sup>, 27,87 m<sup>2</sup>. No entanto, como o tamanho médio de um autocarro elétrico (por exemplo, BYD ebus) é cerca de três vezes o de um carro de passageiros, assumimos que  $a_0 = 900$  ft<sup>2</sup>, 83,61 m<sup>2</sup>. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA (2015), o custo de instalação de um carregador plug-in com 90 kW de potência pode custar até \$40.000. Presumem assim que:

$$C_e = \$40\,000/90\text{kW} = \$444/\text{kW}, \text{ equivalente a } 420.28\text{€/kW}$$

- Estação de troca:

O custo total de construção de uma estação de troca de bateria é de cerca de \$500.000 para automóveis de passageiros (Fehrenbacher et al., 2013). Como mencionado anteriormente, a área de construção necessária para um carregador para autocarros é de 600 ft<sup>2</sup> mais do que o necessário para os automóveis de passageiros. Assim, assumiram que

$$C_f = \$500.000 + \$104/\text{ft}^2 \times 600 \text{ ft}^2 = \$562.400, \text{ equivalente a } 532.367,84\text{€}$$

- Faixas de carregamento

Com base nos estudos de Liu and Song (Liu and Song et al., 2017), o custo médio das faixas de carregamento é de \$200/m, ou seja,

$$A1 = \$321.800/\text{mi}$$

Equivalente a 189.202,41€/km

Parte-se então para a análise da performance das baterias, custo e eficiência.

O custo médio de um inversor que pode suportar 80 kW é de \$20.000. O custo unitário do inversor é de \$250/kW, equivalente a 236,67€/kW. Além disso, assumiram que o custo fixo de construção de um segmento de faixa de carregamento é de \$20.000.

De acordo com Bi (Bi et al. 2015), a eficiência de carregadores plug-in nas estações de carregamento e estações de troca é de 90%, e a eficiência das faixas de carregamento é de 85%.

Os carregadores plug-in nas estações de carregamento e de troca são assumidos como de carregamento rápido, com 90 kW de potência de carregamento. Assume-se que a potência de carregamento das faixas é de 80 kW, que é consistente com o sistema EVR (Liu e Song, 2017). A eficiência está fixada nos 60% (Bi et al., 2015).

O custo de fabrico de uma bateria para um ebus BYD pode variar entre \$220/kWh, 208,27€/kWh, a \$570/kWh, 539,61€/kWh (Jang et al., 2016). Assumiu-se o valor por defeito, \$570/kWh, 539,61€/kWh.

Relativamente ao atraso no acesso e saída de uma estação de carregamento ou de troca de bateria é assumido como sendo de 5 min, e o tempo de troca de bateria na estação de troca é de cerca de 5 minutos. Portanto, temos  $t_0 = 5 \text{ min}$  e  $t_1 = 10 \text{ min}$ .

Assim, com base nos valores por defeito da Tabela acima, a Fig abaixo apresenta o custo total, o tamanho da bateria, o tamanho da frota, e o atraso de carregamento para diferentes planos.

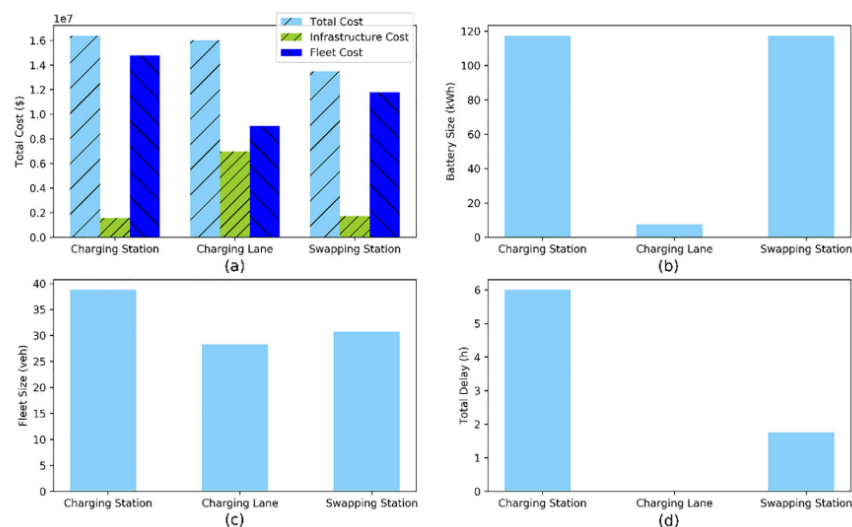


Figura 5- Resultado no cenário nominal. Fonte: "A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations" de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018



Como ilustrado na Fig. 5, o custo total mínimo é alcançado através das estações de troca de baterias.

Os resultados também comparam o custo da infraestrutura, bem como o custo da frota. A estação de carregamento produz o menor custo de infraestrutura, mas o maior custo de frota. Isto pode ser explicado pelo menor custo de construção associado e à necessidade de uma frota maior. No entanto, o atraso total de carregamento para cada autocarro nas estações de carregamento é grande. Assim, o tempo de viagem de um autocarro irá inevitavelmente aumentar significativamente.

Pelo contrário, usando as faixas de carregamento, o investimento inicial é bem maior, devido ao elevado custos de construção da sua infraestruturas. No entanto, o número de autocarros necessários para realizar a operação é menor. Além disso, não sofrem quaisquer atrasos de carregamento durante a operação.

As estações de troca podem equilibrar os custos de infraestruturas e os custos da frota. Os atrasos possíveis no carregamento de viaturas são relativamente pequenos, o que permite que não seja necessário um aumento grande no número de viaturas. Para além disso, os custos relacionados com a infraestrutura são também bastante reduzidos comparados com os custos das faixas de carregamento.

Avançando para a segunda parte do estudo, com uma análise sensitiva a variantes que possam afetar o sistema, novas conclusões são obtidas. As variantes em análise foram a frequência (i.e.  $f$ ), distância de circulação (i.e.,  $l$ ), o número de horas em operação (i.e.,  $T$ ), e a velocidade de operação (i.e.,  $v$ ).

Com alteração da frequência de serviço  $f$  conclui-se que os custos totais aumentam com o aumento de  $f$ . Isto deve-se há necessidade de haver um aumento na frota.

Para  $f < 2$ , as estações de carregamento produzem o mínimo custo total, sendo esta a estratégia ideal para um sistema de trânsito com uma frequência de serviço muito baixa.

As estações de troca de bateria demonstram-se mais rentáveis quando  $2 \leq f \leq 8$ .

As faixas de carregamento têm o melhor desempenho quando  $f \geq 8$ .

A última mostra competitividade de custos num sistema de trânsito com elevada frequência de serviço. Como não há atraso de carregamento para a utilização desta tecnologia, o tamanho da frota aumenta menos em comparação com as outras duas táticas de carregamento.

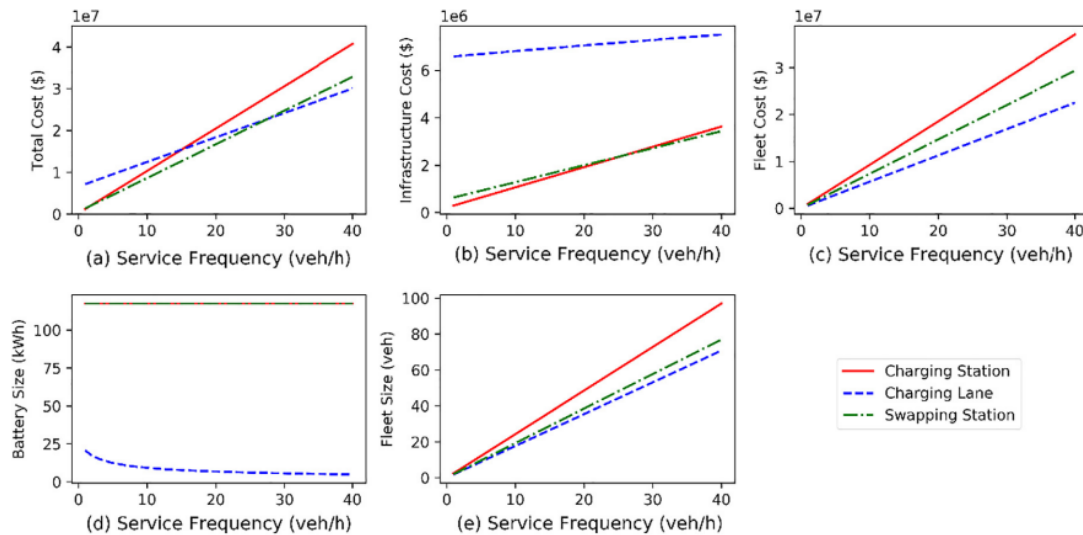


Figura 6 – Análise sensitiva tendo em conta a frequência  $f$  fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

O tamanho da bateria correspondente usando a estratégia de faixas de carregamento é sempre menor do que os outros cenários (ver Fig. 3d). Consequentemente, os custos da frota na utilização das faixas de carregamento são geralmente muito inferiores aos custos dos outros planos quando  $f$  aumenta (ver Fig. 6c). Embora o custo das infraestruturas das faixas de carregamento seja mais elevado, a sua proporção em relação ao custo total diminui. Como resultado, as faixas de carregamento podem atingir custos totais mínimos quando  $f$  se torna suficientemente grande, que é o caso dos sistemas de trânsito com linhas densas de autocarros, tais como os corredores BRT em Guangzhou, Bogotá, e Brisbane. Isto é consistente com as conclusões de Park e Jeong (2017), segundo as quais o uso de faixas de carregamento se torna mais eficiente numa megacidade, onde as estradas podem ser utilizadas por uma grande quantidade de VE.

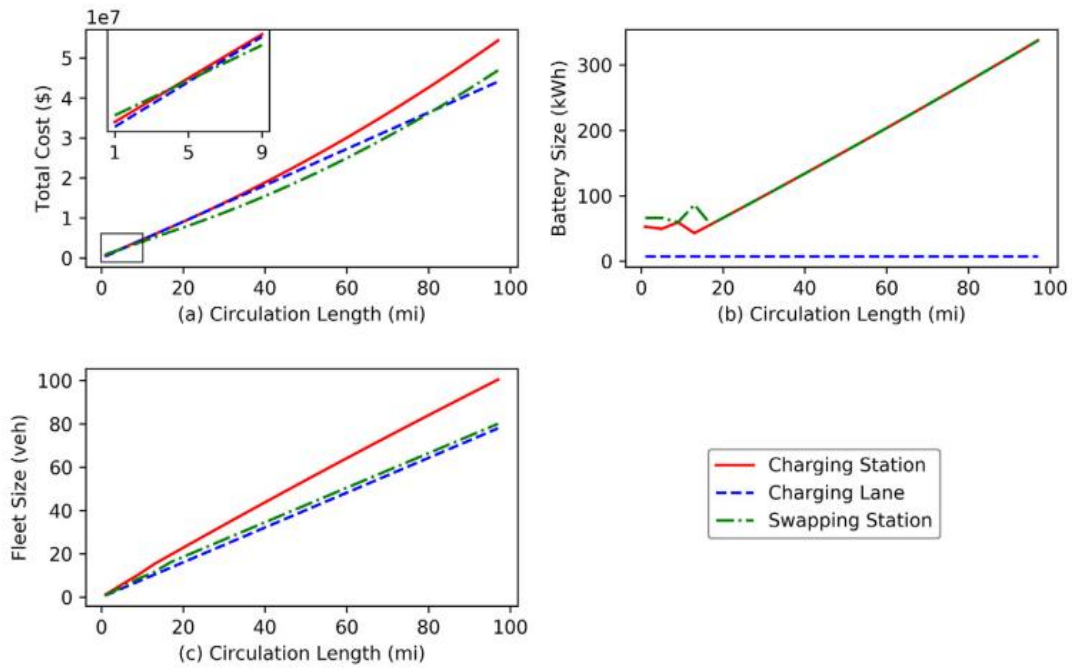


Figura 7 -Análise sensitiva tendo em conta a distância de circulação  $l$  fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

A figura 7 demonstra como o comprimento de circulação  $l$  irá alterar o custo total, o tamanho da bateria, e o tamanho da frota. Neste aspeto temos que:

- As estações de troca mostram-se mais competitivas quando  $l \in [5, 80]$ ;
- As faixas de carregamento tornam-se competitivas quando o comprimento de circulação é muito curto ( $l < 5$  mi) ou muito longo ( $l > 80$  mi).
- À medida que  $l$  aumenta, o tamanho da bateria permanece constante para as faixas de carregamento, enquanto o tamanho das baterias associadas a estações de carregamento e troca podem flutuar sem um padrão claro no início, e depois aumentar linearmente.

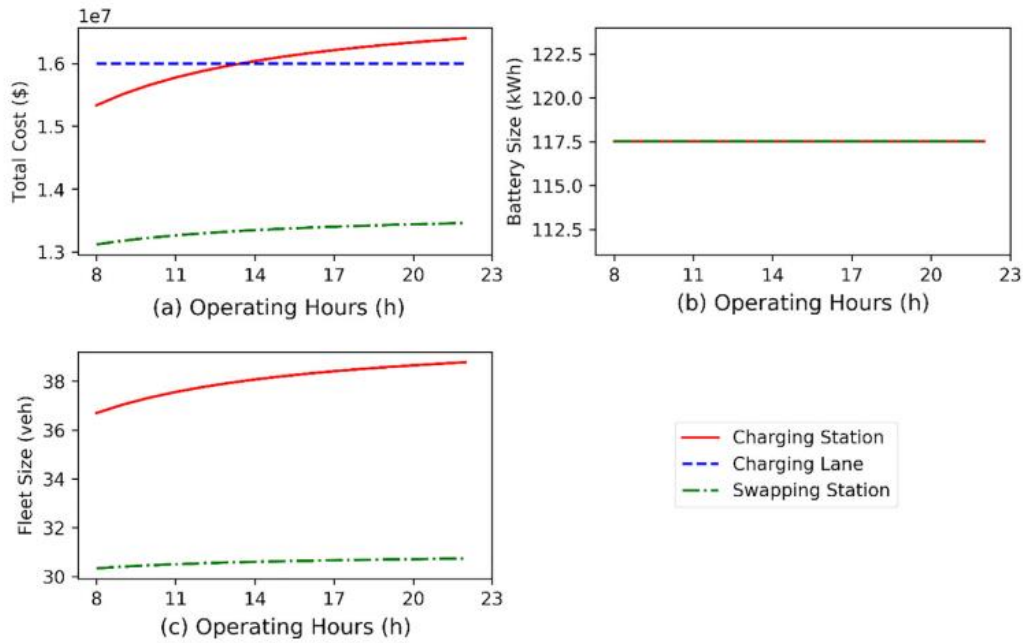


Figura 8 – Análise sensitiva tendo em conta as horas de operação  $T$  fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

A figura 8 descreve a tendência de alterações nos custos totais, tamanho da bateria e tamanho da frota em relação ao número de horas de funcionamento  $T$ .

Uma vez que o modelo de conceção das faixas de carregamento nada tem a ver com  $T$ , exceto o custo total, que é utilizado como uma referência, é ignorada neste estudo.

O aumento de  $T$  conduzirá a ligeiros aumentos nos custos totais tanto para as estações de carregamento e de troca. No entanto, as estações de troca continuam a ter um custo competitivo, mesmo quando  $T$  aumenta para 22 h. Ou seja, o número de horas de funcionamento  $T$  tem pouco impacto na competitividade dos custos. Nota-se também que à medida que o atraso no carregamento das estações de carregamento se torna mais severo, o incremento na dimensão da frota correspondente é mais notável do que o das estações de troca.

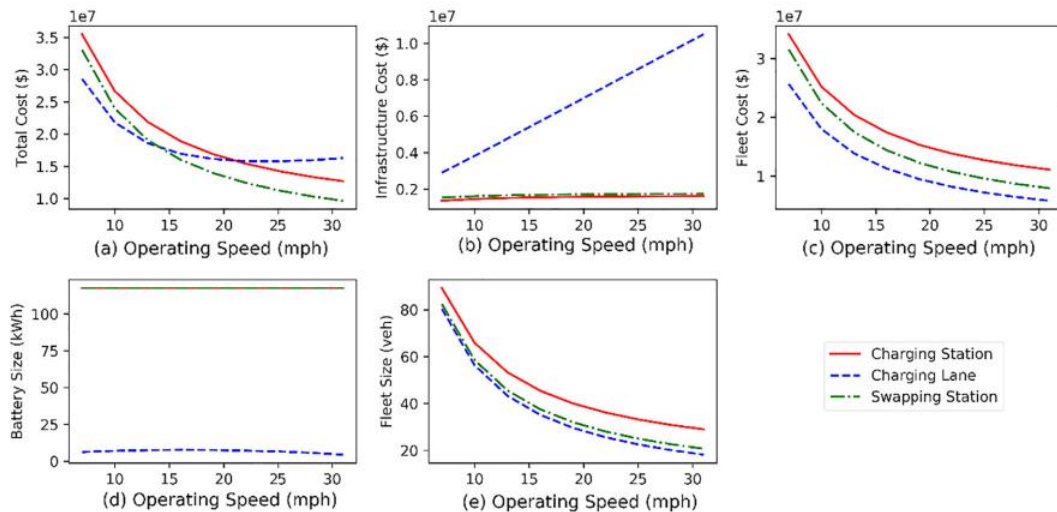


Figura 9 – Análise sensitiva em relação à velocidade de operação  $v$  fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

A figura 9 explora o impacto da velocidade de operação (i.e.,  $v$ ) em diferentes instalações de carregamento.

À medida que  $v$  aumenta:

- O total dos custos de estações de carregamento e de troca diminui, uma vez que os custos da sua frota podem ser significativamente reduzidos. Ainda assim, os custos de infraestruturas aumentam ligeiramente. Isto deve-se ao facto de ser necessária uma frota mais pequena para manter a frequência de serviço quando  $v$  aumenta.
- O custo total das faixas de carregamento pode inicialmente diminuir e depois aumentar. Isto porque quando  $v$  aumenta, o custo da frota diminui e o custo das infraestruturas aumenta significativamente, uma vez que é necessário construir mais faixas de carregamento para garantir as necessidades de carregamento da frota de autocarros.

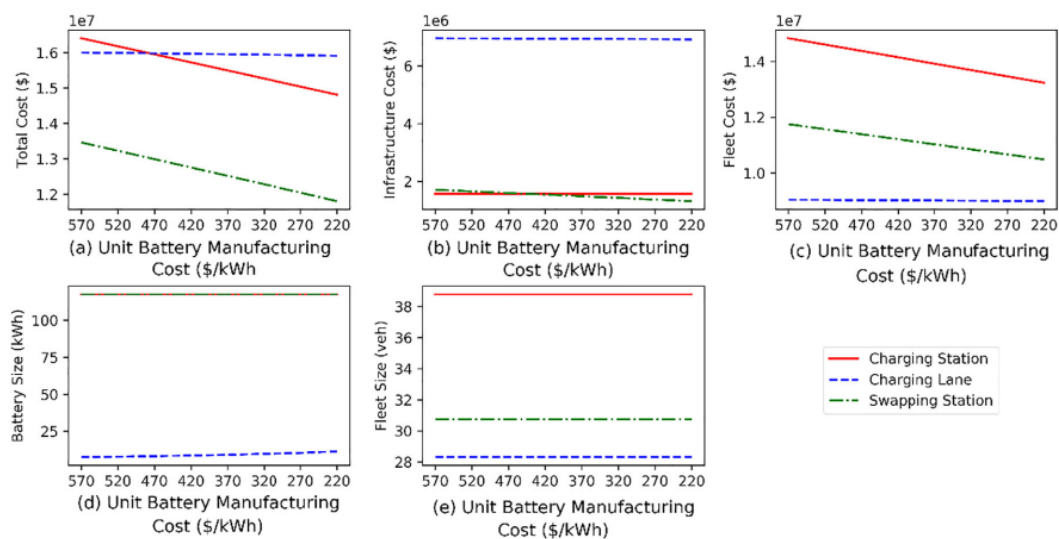


Figura 10 – Análise sensitiva em relação ao custo de produção de uma bateria  $C$  fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

A figura 10 investiga a relação entre o custo de fabrico da bateria e o custo total. Com  $C_e$  decrescente, o custo total irá diminuir.

- Como a dimensão da bateria associada às faixas de carregamento é a menor, a diminuição do custo total correspondente é insignificante;

- Esta diminuição beneficia as estações de carregamento e de troca.

- A diminuição do custo total nas estações de carregamento explica-se com a diminuição do custo da frota;

- A diminuição do custo total das estações de troca é atribuível à redução tanto dos custos de infraestruturas como da frota.

Além disso, a dimensão da bateria e frota de estações de troca e carregamento não são afetadas pela diminuição da  $C_e$ . Portanto, quando a  $C_e$  diminui, os custos da frota de estações de carregamento e de troca diminuem linearmente, assim como o custo das infraestruturas das estações de troca.

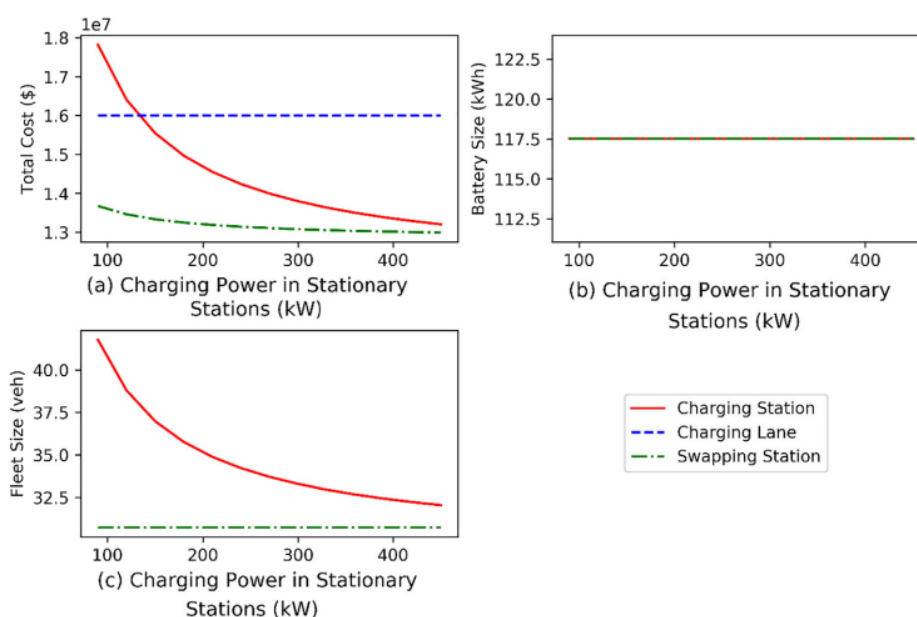


Figura 11 – Análise sensitiva em relação ao poder de carregamento nas estações fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

A figura 8 indica o impacto da potência de carregamento nas estações estacionárias (i.e.,  $P$ ) sobre alterações ao custo total, tamanho da bateria, e tamanho da frota correspondente às estações de carregamento e de troca.

Não surpreendentemente, o custo total das estações de carregamento diminui muito mais significativamente do que o de estações de troca. Isto deve-se ao  $P$  mais alto pode resultar em menos atrasos de carregamento e, portanto, numa frota mais pequena. Como os atrasos no

carregamento são quase imperceptíveis no sistema de troca de baterias, esta mudança acaba por ter pouco impacto nos tempos de troca, não afetando o tamanho da frota.

No entanto, à medida que o  $P$  sobe, o número de carregadores necessários para ser instalado em cada estação de troca pode ser reduzido, e o custo total correspondente.

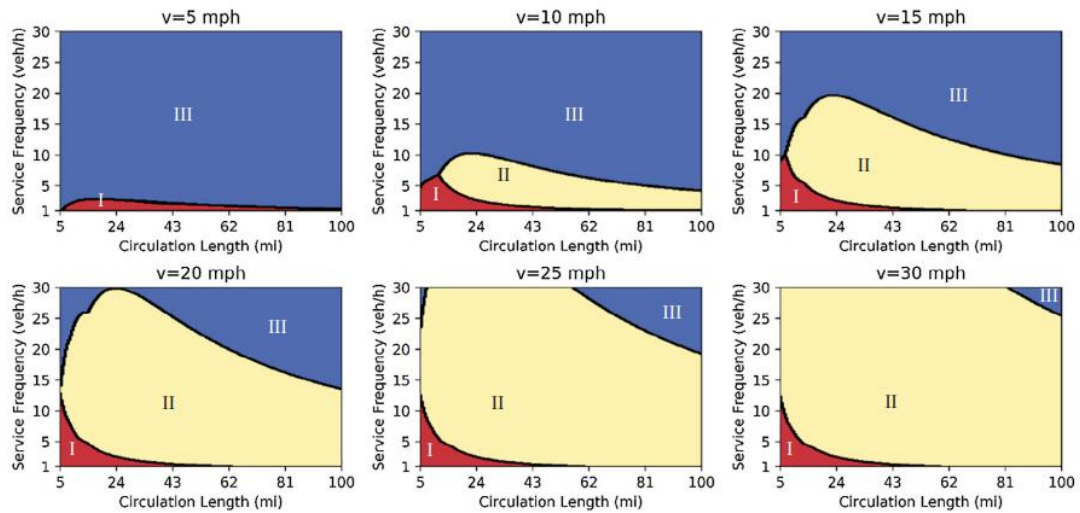


Figura 12 – Mudança da competitividade de diferentes estruturas de carregamento tendo em conta a frequência e a distância de circulação para diferentes níveis de velocidade (I-III representa os domínios competitivos de estações de carregamento, estações de troca e faixas de carregamento, respetivamente) fonte: “A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations” de Zhibin Chen, Yafeng Yin, Ziqi Song, 2018

Conclui-se então que alguns parâmetros operacionais de um sistema de trânsito têm um impacto significativo na competitividade dos custos das diferentes estratégias a adotar. Estes parâmetros são a frequência de serviço (ou seja,  $f$ ), o comprimento de circulação (i.e.,  $l$ ), e a velocidade de operação (i.e.,  $v$ ).

A figura 12 demonstra como a competitividade dos diferentes tipos de infraestruturas varia de acordo com a variação destes parâmetros.

Como podemos observar, quando a velocidade de operação é baixa, por exemplo,  $v \leq 10$  mph,  $v \leq 16,1$  km/h, o domínio competitivo das faixas de carregamento ocupa a maior parte do espaço bidimensional, mas dissipa-se quando a velocidade de operação aumenta.

Em contraste, com o aumento da velocidade de operação as estações de troca tornam-se muito mais competitivas em termos de custos, ocupando mais de 80% do espaço bidimensional quando  $v = 30$  mph,  $v = 48,28$  km/h.

No caso das estações de carregamento, percebe-se que com o aumento da velocidade de circulação tornam-se mais competitivos.

Através destes resultados pode-se concluir que as faixas de carregamento são uma tecnologia a usar idealmente em sistemas de trânsito com alta frequência de serviço e baixa velocidade de operação. Para além disso pode-se dizer que estações de carregamento devem ser usadas num sistema de trânsito com relativa baixa frequência e/ou serviços de curta circulação. Conclui-se

também que as estações de troca são economicamente viáveis para sistemas de trânsito com alta velocidade de operação.

#### 4.1.2. Aplicar resultados ao Caso de Estudo

Baseando-me no artigo apresentado, são necessárias perceber valores de 3 parâmetros na operação da STCP para perceber que tecnologia de carregamento de autocarro deve ser aplicada na cidade do Porto, e mais particularmente na operação da empresa. Estes parâmetros a saber são a velocidade média, a frequência de serviço e a distância de circulação.

Para isso alguns dados da operação da STCP foram analisados. Foi analisado o relatório de contas do terceiro trimestre do ano de 2021 (anexo 2) e ainda bases de dados da empresa no software de GIST, que permitiram a análise de Planeamentos Operacionais ativos da empresa.

O valor da velocidade média foi obtido através da análise do relatório de contas do mês de junho de 2021, em cima o excerto, com o valor de 15,9 km/h. Importante denotar que este valor precisa ser passado para mph, sendo equivalente a 9,8 mph.

$$15.9 \text{ km/h} / 1.609344 = 9.8798019566 \text{ mph}$$

A distância de circulação pode ser obtida através da divisão do número total dos km de serviço dos veículos pelo número de dias do mês analisado, ou seja, 64,13 km. Este valor tem de ser passado ainda para ml, sendo equivalente a 39,85 ml.

$$1924 \text{ km} / 30 = 64.1333333$$

$$64.13\text{km} / 1.609344 = 39.848534558\text{ml}$$

Para o cálculo da frequência de serviço, foi preciso analisar todos os planeamentos operacionais do caso em estudo. Foram analisadas todas as megalinhas que estão associadas à estação de recolha da STCP de Francos. Para cada linha dentro de cada megalinha, dividiu-se o número de viagens total dessa linha à amplitude (distância temporal entre o início da primeira viagem e o fim da última) da mesma linha, obtendo-se a frequência de viagens por hora nessa linha. Depois disso fez-se a média total, incluindo todas as 39 linhas da operação, chegando-se ao valor final de, aproximadamente, 6,30 viagens por hora (ver em anexo 1).

Sendo assim, os valores a serem analisados são:

Velocidade Média: 9,8 mph, aproximadamente 10 mph

Distância de Circulação: 39,85 mi

Frequência: 6,30 Veículos/hora

Olhando mais uma vez para os resultados do artigo analisado temos:



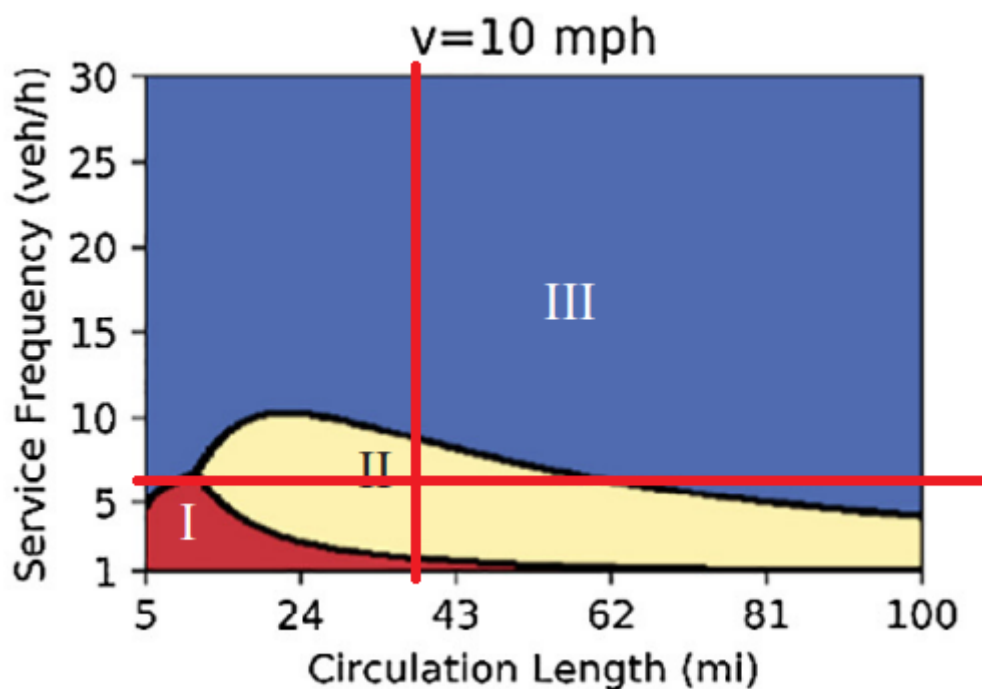


Figura 13 – Cruzamento de Dados numa perspetiva de competitividade de custo entre os 3 diferentes tipos de estruturas de carregamento

Percebemos que numa perspetiva de competitividade de custo, a tecnologia que melhor se ajusta à operação da STCP, na cidade do Porto, é a troca de baterias numa estação apropriada para o efeito.

#### 4.2. STCP

Para a realização do caso de estudo o exemplo escolhido foi o da STCP, empresa de referência no que toca ao setor da mobilidade em Portugal.

A STCP, Serviço de Transportes Coletivos do Porto, tem como missão a prestação de serviços de transporte público urbano de passageiros na Área Metropolitana do Porto (AMP), em articulação com todo o ecossistema, contribuindo para a efetiva mobilidade das pessoas, disponibilizando uma alternativa competitiva ao transporte individual privado e gerando, pela sua atividade, benefícios sociais e ambientais, num quadro de inovação, de melhoria contínua, de racionalidade económica, e de sustentabilidade.

A STCP existe desde o ano de 1946, passando a Sociedade Anónima, com capitais exclusivamente públicos, no ano de 1994 e o seu grande objetivo é o de ser uma empresa de referência entre as que apresentam as melhores práticas do setor dos transportes públicos de passageiros, a nível nacional e europeu.

A sua frota inclui autocarros standard, articulados, de dois pisos, minis e ainda elétricos.

A STCP foi o caso de estudo escolhido por ser uma empresa cliente da OPT com a qual mantém excelente relação, o que permitiu aceder a informação necessária para o estudo realizado, como planeamento operacionais usados, rede, linhas usadas, número de veículos a atuar na área em questão distinguidos por tipo de veículo, etc. Para além disso, a STCP atua na zona metropolitana do Porto, cidade onde o estágio foi realizado, o que permitiu ter uma maior conexão com o caso de estudo.

### 4.3. Proposta

Assim, para a aplicação desta tecnologia na simulação a realizar no software GIST, alguns pressupostos foram tidos em conta:

- Será analisada toda a área da operação associada à estação de recolha de Francos, que inclui 7 megalinhas, 39 linhas, 3954 viagens e atualmente 260 viaturas;
- Tempo de troca de bateria será de 5 minutos;
- A troca de baterias ocorrerá na Estação de Recolha, o que do ponto de vista de operação pode não ser o mais otimizado, mas numa fase inicial permite diminuir gastos;
- Planeamentos Operacionais terão por base os já existentes, fazendo as alterações necessárias para que respeitem as novas restrições, aproximando assim o mais possível à operação normal da STCP;
- Serão respeitadas as regras de trabalho da STCP para tripulantes (com serviços mais curtos que outras empresas devido às 40 horas de trabalho semanais serem divididas por 6 dias de trabalho) e também os tipos de serviço para tripulantes que a empresa utiliza;
- Autocarros considerados terão por base os autocarros já usados pela STCP, com autonomia de 250km (STCP et al., 2021), sendo que cada viatura não deverá fazer mais de 215km na mesma etapa.

O modelo usado foi retirado de uma Base de Dados datada do ano de 2019.

### 4.4. Resultados PO

Depois de aplicados os parâmetros definidos no planeamento operacional da STCP conseguiu-se chegar a um novo planeamento, semelhante ao que a STCP utiliza, mas com algumas diferenças importantes, principalmente na criação de serviços de viatura:

- Uma vez que a autonomia de veículos elétricos é bastante menor, serviços de viatura tiveram de ser divididos, de maneira que a viatura pudesse voltar à estação de recolha para a troca de bateria, de forma a não ultrapassarem os 215 km numa parte de serviço;
- Serviços diferentes para a mesma linha tinham, em geral, valores bastante diferentes, podendo no mesmo dia haver serviços para a mesma linha com 300km diários e outros com 70km, o que facilitou a partição de serviços de maneira a torná-los possíveis para veículos elétricos;
- Houve a criação de mais vazios, pois há mais viaturas a ir e voltar à estação de recolha durante o mesmo dia. No entanto, uma vez que se trata de veículos elétricos, estes vazios afetarão apenas os serviços de tripulante, não tendo o mesmo impacto em termos de gastos em combustível e manutenção comparativamente a veículos com combustão interna.
- O número de viaturas obtido foi de 261, mais uma viatura que o planeamento original. Este acréscimo deve-se ao facto de o horário F7 ser um horário com viagens periódicas ao longo do dia, feitas por um número muito reduzido de viaturas.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	41	41	0
F2	35	35	0
F3	49	49	0
F4	26	26	0
F5	56	56	0
F6	47	47	0
F7	6	7	1
Total	260	261	1

Tabela 2 - Resultado Simulação em Relação às Viaturas

- O número de tripulantes obtido foi de 499, mais 6 viaturas que o planeamento original. Acredito que este acréscimo se deve, principalmente, à falta de experiência na criação de planeamentos operacionais. Ainda assim, é um resultado bastante interessante.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	78	78	0
F2	68	68	0
F3	91	93	2
F4	49	48	-1
F5	104	107	3
F6	87	89	2
F7	16	16	0
Total	493	499	6

Tabela 3 - Resultado Simulação em Relação aos Tripulantes

#### 4.5. Análise Sensitiva

De maneira a tentar perceber melhor a afetação da introdução de veículos elétricos no planeamento da empresa segue-se uma análise sensitiva com a comparação de distância percorrida total, distância percorrida em vazio, tempo total, tempo total em vazio e tempo em paragem.

##### 4.5.1. Distância Total:

A distância total depois da simulação é de 47.221,13km, sendo 1,5% maior que a distância original é de 46.510,37. Este aumento deve-se muito ao maior número de viagens em vazio, sendo que praticamente 60% da diferença é o somatório das diferenças em F1 e F3, representando um aumento de 444,74km de uma diferença total de 710,76km.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	8 181,78	8 376,68	194,90
F2	5 688,65	5 738,65	50,00
F3	9 663,39	9 913,23	249,84
F4	4 090,16	4 124,06	33,90
F5	9 197,89	9 279,07	81,18
F6	8 351,18	8 416,12	64,94

F7	1 337,32	1 373,32	36,00
Total	46 510,37	47 221,13	710,76

Tabela 4 - Resultado Simulação em Relação à Distância Total Percorrida (km)

#### 4.5.2. Distância total em vazio:

Os vazios têm um papel importante no planeamento operacional, uma vez que devem ser mais curtos e em menor quantidade possível de maneira a reduzir gastos desnecessários no planeamento. No entanto, de maneira a ser possível a troca de baterias durante o dia o número em vazio aumentou, passando de 3242,06 km para 3955,75 km, uma diferença de 713,69 km. Este é um aumento bastante bruto, representando uma subida de, aproximadamente, 22%. Apesar de o impacto dos veículos elétricos ser menor que os veículos de combustão interna, este pode ser um fator de decisão importante. De notar ainda que os horários F1 e F3, em conjunto, representam um aumento de 435,74 km em vazio, cerca de 61% do valor total em vazio.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	446,3	641,2	194,9
F2	514,7	564,7	50
F3	693,88	934,72	240,84
F4	271,65	305,55	33,9
F5	738,75	819,65	76,87
F6	510,78	587,65	76,87
F7	66	102	36
Total	3 242,06	3 955,75	713,69

Tabela 5 - Resultado Simulação em Relação à Distância Total Percorrida em Vazio (km)

#### 4.5.3. Comparação Tempo em Vazio

Com o aumento da distância em vazio fica importante perceber qual o impacto em tempos de deslocação. Há aqui um aumento relativamente grande, passando de 11739 minutos para 13486 minutos, com diferença de 1747 minutos, que representa um aumento de, aproximadamente, 15 %. Mais uma vez, destacar o impacto dos aumentos dos valores em F1 e F3, num total de 1023 minutos, representando, aproximadamente, 59% do tempo total em vazio.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	1605	1998	393
F2	1711	1862	151
F3	2080	2710	630
F4	949	1032	83
F5	2885	3091	206
F6	2273	2437	164
F7	236	356	120
Total	11 739	13 486	1747

Tabela 6 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo em Vazio (min)

#### 4.5.4. Comparação Tempo em Paragem

O tempo de paragem tem um aumento relativamente baixo, passando de 26939 minutos para 27482 minutos, com um aumento de 543 minutos, cerca de 2%. De notar que em 3 horários, F3, F6 e F7 o tempo em paragem baixou e que em F1 há um aumento grande de 995 minutos.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	4284	5279	995
F2	2902	2902	0
F3	4881	4620	-261
F4	2159	2164	5
F5	5747	5762	15
F6	5617	5490	-127
F7	1349	1265	-84
Total	26939	27482	543

Tabela 7 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo em Paragem (min)

#### 4.5.5. Comparação Tempo Total

Em conformidade com o aumento do tempo em vazio e o aumento do tempo em paragem, o tempo total aumenta 2280 minutos, uma diferença mínima no bolo total, representado apenas um aumento de cerca de 1%. Este aumento deve-se apenas ao aumento do tempo de paragem e em vazio, sendo a soma dos valores totais dos dois.

Horário	Antes (STCP)	Depois (Simulação)	Diferença
F1	29 591	30 979	1388
F2	24 267	24 418	151
F3	34 690	35 059	369
F4	18 409	18 497	88
F5	38 980	39 201	221
F6	33 262	33 299	37
F7	5921	5957	36
Total	185 120	187 410	2290

Tabela 8 - Resultado Simulação em Relação ao Tempo Total (min)

#### 4.4.1 Custos Associados

Em relação à comparação de custos decidiu-se comparar os custos de ciclo de vida (12 anos) de uma frota totalmente elétrica da frota usada no planeamento da STCP.

Importante perceber alguns dados retirados de relatórios de contas dos últimos anos da empresa cliente.

Para o cálculo dos custos do ciclo de vida foram comparados os valores totais de 425 viaturas elétricas, a diesel, e movidas a gás natural, respetivamente.

A frota de autocarros no ano de 2019 tinha um total de 425 viaturas, das quais:

- 142 são movidas a diesel;
- 12 são elétricas;
- 268 são movidas a gás natural.

De maneira a tornar os resultados da amostra de viagens escolhida o mais fiáveis possível, decidiu-se perceber a proporção de veículos alocados à estação de Francos, que representa cerca de 60% da frota. Daí conclui-se que a frota associada à estação de Francos conta com:

- 88 viaturas movidas a diesel;
- 8 viaturas elétricas:
- 164 viaturas movidas a gás natural.

O investimento inicial num autocarro a diesel, gás natural ou elétrico, é de (Topal & Nakir, 2018):

- Diesel: 127 000€;
- Gás Natural: 175 300€;
- Elétrico: 359 000€.

Segundo os mesmos autores, o custo de manutenção e operação é de:

- 0,19€ por km em veículos movidos a gás natural;
- 0,40€ por km em veículos movidos a diesel;
- 0,15€ por km em veículos movidos a eletricidade.

Sendo que estes custos de manutenção e operação incluem:

- Custos de prevenção de manutenção;
- Custo inicial da viatura;
- Custos de manutenção de motor;
- Custos de reparo de estragos;
- Custo de material;
- Custo de mão de obra;
- Custos gerais e administrativos;
- Custos associados ao depósito de energia (eletricidade, água, gás natural);
- Custos associados a inspeções e autorizações de circulação;
- Impostos. (Topal & Nakir, 2018)

Em relação ao custo em combustível/eletricidade, recorreu-se à análise do relatório consolidado de contas da STCP do ano de 2021 (STCP et al., 2021) . Após feita a proporção de consumos, os resultados são os seguintes:

- Consumos:
  - Autocarros GN: 12 833 562 m<sup>3</sup>;
  - Autocarros E: 625 312 kWh;
  - Autocarro D: 1 729 416 litros.

Com gastos por unidade de combustível de:

- Autocarros GN: 0,327 €/m<sup>3</sup>;
- Autocarros E: 0,107 €/kWh;
- Autocarros D: 0,981 €/l.

Sendo que nesta altura a frota era composta por 438 veículos, 342 movidos a gás natural, 15 autocarros elétricos e 81 autocarros movidos a diesel.

Aplicando os dados a um ciclo de vida de um veículo, a 12 anos, temos:

	Elétrico	Diesel	CNG
Custo de Compra	359 000	127 000	175 300
Custo Combustível/Eletricidade	53 520	251 340	147 240
Custo Manutenção	93 429	118 343,4	249 144
Total	505 949	496 683	571 684

Tabela 9 - Custo de Ciclo de Vida de uma viatura elétrica, a diesel e CNG

Sendo de notar que a viatura mais competitiva seria a movida a diesel, seguida do motor elétrico e no final a movida a gás natural.

#### 4.4.2. Emissões

Em termos de emissões há alguns dados que podem ser retirados dos relatórios de contas da STCP do ano de 2019, ano da base de dados usada no estudo.

No ano de 2019 a STCP teve um total de 33970000 tep (tonelada equivalente de petróleo) (STCP et al., 2019) (ver em Anexo 3).

Segundo dados da Carris (WeElectric et al., 2021), por cada km um autocarro elétrico poupa 1,5kg CO<sub>2</sub> em emissões com autocarro movidos a Diesel. Para além disso, segundo o estudo feito pela autarquia do Barreiro (Figueiredo et al., 2016), autocarros movidos a gás natural emitem menos 8% de emissões em CO<sub>2</sub> que autocarros a Diesel, reduzindo drasticamente a emissão de outro tipo de gases, como o Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e partículas sólidas.

Assim, é preciso ter em conta a quantidade de quilómetros feita por cada tipo de veículos no ano de 2019. Nesse ano foram percorridos cerca de 22 milhões de km, proporcionalmente e tendo em conta o número de veículos de cada tipo, conclui-se que 7 372 305 km foram percorridos por veículos movidos a diesel e 14 692 695 km foram movidos por autocarros movidos a gás natural.

Assim temos que a passagem a elétricos permite reduzir a emissão de cerca de 30 milhões de quilogramas de CO<sub>2</sub>.

$$7\,372\,305 \times 1,5 + 14\,692\,695 \times 1,3 = 30\,158\,960 \text{ kg CO}_2$$

## 5. Conclusões

### 5.1. Sumário do projeto e resultados

A preocupação com o meio ambiente tem vindo a crescer nos últimos anos e o mundo dos transportes tem uma responsabilidade a assumir neste âmbito, tem de haver uma mudança de

paradigma. Um dos objetivos deste relatório foi o de mostrar como essa mudança poderá surgir, num caso prático, baseado na cidade do Porto, numa atividade operacional real.

O projeto dividiu-se em duas fases:

- A análise ao planeamento operacional da STCP, avaliando como poderia ser feita a introdução de uma frota 100% elétrica de autocarros;
- O estudo dos custos e de diferenças na operação, comparando o antes e depois da simulação, com posterior cálculo e comparação nos níveis de emissões.

Depois da aprendizagem do software GIST na perspetiva do utilizador, e da análise de diferentes planeamentos operacionais, realizados por diferentes empresas, tentou-se desenvolver uma solução aceitável para a introdução de uma frota 100% elétrica de autocarros no planeamento operacional da STCP. Para isso foi preciso ter em conta vários parâmetros e limitações deste veículo.

Depois de realizada a análise sensitiva percebe-se que a passagem para elétricos gera algumas mudanças importantes no planeamento:

- Há partição de serviços de viatura em linhas mais longas;
- Há mais viagens em vazios;
- O centro de recolha tem uma maior atividade durante o dia;

É preciso ter em atenção que embora a simulação tenha como resultado a atribuição de mais serviços de tripulantes e viatura, o aumento destes valores não é certo. Para isso seria necessário alguém mais experiente na utilização do software GIST realizar a mesma. Ainda ter em conta que o planeamento pode ser otimizado, fazendo com que a partição das linhas vá de encontro ao tempo necessário para tipos de serviço de tripulante.

Mesmo assim, os resultados obtidos apresentam um aumento da distância total percorrida, que que pode ser atribuído ao aumento das viagens em vazio e partição de serviços de viatura; há também um aumento no tempo em viagem total que se deve ao aumento da distância total percorrida.

Apesar destes dados aumentarem, importante perceber que os custos de manutenção sofrem impactos bastante reduzidos, o que faz com que estes aumentos não sejam tão graves. Isto deve-se aos custos de manutenção de um veículo elétrico ser muito mais baixo que os custos de manutenção de veículos movidos a gás natural ou por combustão interna.

Ter em atenção ainda que o aumento do número de veículos necessários, e o aumento do número de tripulantes necessários, faz com que haja maiores gastos nestas áreas. Por viatura elétrica necessária, são esperados gastos de aproximadamente 7 785,75€ em manutenção por ano, e por tripulante são esperados gastos de 25 572,19€, por ano, sem extraordinários.

Assim, num total e tendo em conta os resultados obtidos, haveria um custo acrescentado de 161 218,89€, por ano, sem extraordinários.

Partindo para a análise dos resultados da segunda parte do estudo, fica claro que o mundo dos elétricos está para chegar, mas provavelmente ainda não é a hora deles. Olhando para o ciclo de vida dos 3 tipos de veículos avaliados, os elétricos surgem como os segundos mais rentáveis,



apenas ultrapassados pelos veículos a diesel. No entanto, é preciso realçar que o preço das infraestruturas de troca de baterias não foi tido em conta.

De tomar nota a poupança notável de mais de 30 mil toneladas de CO<sub>2</sub> poupado em emissões pela alteração da frota em estudo usada pela STCP e por uma 100% elétrica.

## 5.2. Reflexão sobre o trabalho desenvolvido

A análise à situação atual permite perceber que há uma oportunidade de mudança enorme, quer na situação do caso de estudo, quer num âmbito mais geral, alastrado a todo o setor.

O trabalho desenvolvido permite perceber que a entrada de veículos elétricos no funcionamento operacional de uma empresa de transportes traz as suas alterações, e transforma a maneira como se olha para o mesmo, mas mostra que há realmente uma oportunidade e uma janela onde se poderá trabalhar.

Como mencionado em cima, os resultados do planeamento efetuado através do software GIST podem e devem ser otimizados, de maneira a reduzir o número de tripulantes e veículos necessário para o seu cumprimento. Resultado pode ser otimizado se criação de serviços for feita pensando simultaneamente nos serviços de tripulante e viaturas, ajustando, por exemplo, a primeira parte de um serviço de viatura a um serviço de tripulante do tipo seguido.

Para a adoção deste tipo de veículos há um custo grande associado, principalmente no que toca a infraestruturas, mas que, a meu ver, é inevitável a médio prazo, pelo que deve ser uma opção a ser estudada.

O estudo desenvolvido é importante para a OPT, pois pode ser usado como ferramenta em serviços de consultoria no setor da mobilidade.

Há ainda a realçar o enorme impacto que esta alteração poderá vir a trazer para o planeta, poupando que toneladas de CO<sub>2</sub> sejam emitidas para a atmosfera, gerando o melhor ambiente para todos os que vivem nela.

## 5.3. Future Trends

Há, para já, um número reduzido de trabalhos na área, e todos os estudos feitos são recentes. Mas não há dúvida que o mundo elétrico e verde é o futuro. Para isso, há já novas trends que prometem vir a revolucionar o mundo dos transportes:

### **Agregador de Autocarros Elétricos**

O agregador de VEs é um novo *player* no mercado de eletricidade, que coleta VEs atraindo e retendo-os como uma carga significativa que pode impactar benéficamente a rede. O tamanho da agregação é crucial para garantir o seu papel. Um agregador de VEs pode funcionar como uma carga controlável ou como um recurso (Guille & Gross et al., 2009). Importante referir que o sistema de troca de baterias pode também ele mesmo ser considerado uma entidade agregadora, uma vez que agrega baterias elétricas no mesmo espaço.

## **Micro Redes com Autocarros Elétricos e Fontes de Energia Renováveis**

Uma micro rede é descrita como um cluster de cargas, unidades de geração distribuída e sistemas de armazenamento de energia, que funcionam juntos fornecendo eletricidade de forma fixa, seja conectada a um sistema de energia num único ponto de conexão ou em isolamento. Além disso, uma micro rede pode operar conectado à rede ou autonomamente, dependendo das condições da rede e das transições entre esses dois modos (Olivares et al., 2014).

Comunidades remotas ou ilhas localizadas longe de um continente dependem de micro redes, que geralmente são alimentadas à base de óleo diesel, que é prejudicial ao meio ambiente (Arriaga et al., 2016). Esses efeitos são ainda piores se forem considerados ambientes intocados e protegidos (Clairand, Arriaga, et al., 2019).

Portanto, micro redes com fontes de energia renováveis são uma tendência. Há, mesmo assim, preocupações no que toca há estabilidade das mesmas, devido às incertezas e flutuações de geração de energia por fontes de energia renováveis. Um transporte público elétrico parece ser uma solução adequada para fornecer transporte limpo, bem como para mitigar problemas de estabilidade da micro rede com o uso de suas baterias como armazenamento de energia.

#### **V2G para Autocarros Elétricos**

O V2G (Veículo para a Rede) é considerado uma técnica em que os VEs não apenas absorvem eletricidade da rede, mas também podem fornecer eletricidade à rede a partir das suas baterias, quando a rede assim o exigir (Kempton, Tomić et al., 2005). O V2G pode oferecer quatro serviços diferentes para a rede: potência de carga de base, potência de pico, reservas giratórias e serviços auxiliares, sendo os dois últimos foram considerados serviços auxiliares (Kempton, Tomić et al., 2005). Esta tendência tem sido amplamente estudada para VEs privados. Como AEs possuem baterias de maior capacidade, o V2G poderia ser implementado para sistemas de trocas de bateria, uma vez que podem ter flexibilidade de tempo em relação a outros métodos de carregamento.

## 6. Anexos e Apêndices

### Apêndice 1 - Cálculo da frequência na operação da STCP

Linha	Hora início	Hora fim	Amplitude	Nº viagens	Nº viagens/hora	Zona	Viaturas
202	05:20	21:53	17	114	6,888217523	F1	41
208	05:55	21:33	16	78	4,989339019		
501	05:50	01:45	20	96	4,820083682		
507	05:40	01:33	20	91	4,576697402		
601	05:10	01:35	20	90	4,408163265		
602	05:20	00:58	20	149	7,589134126		
201	05:20	21:45	16	153	9,319796954	F2	35
207	05:45	21:53	16	158	9,79338843		
900	05:50	21:35	16	59	3,746031746		
901	05:15	01:53	21	92	4,458804523		
906	05:50	01:15	19	87	4,480686695		
205	05:23	01:35	20	227	11,23762376	F3	49
300	06:00	21:50	16	67	4,231578947		
301	05:58	21:45	16	60	3,801478353		
505	05:45	00:13	18	69	3,736462094		
506	05:50	00:50	19	91	4,789473684		
5M	00:10	05:58	6	12	2,068965517		
603	05:40	00:45	19	81	4,244541485		
604	05:18	21:58	17	82	4,92		
302	06:25	21:30	15	70	4,640883978	F4	26
303	05:50	21:33	16	73	4,644750795		
304	05:50	21:18	15	98	6,336206897		
600	05:30	00:53	19	213	10,98882201		
8M	00:10	05:58	6	12	2,068965517		
204	05:50	21:58	16	163	10,10330579	F5	56
209	06:43	20:13	14	44	3,259259259		
402	05:48	01:10	19	153	7,900172117		
502	05:40	00:55	19	173	8,987012987		
508	05:40	01:28	20	132	6,666666667		
704	05:15	22:13	17	146	8,605108055		
503	05:40	01:03	19	76	3,920894239	F6	47
504	06:10	01:08	19	106	5,588752197		
803	05:50	01:35	20	88	4,455696203		
902	05:35	01:33	20	112	5,609348915		
903	05:30	01:30	20	174	8,7		
907	05:35	21:40	16	126	7,834196891		
9M	00:10	05:58	6	12	2,068965517		
100	04:00	02:23	22	68	3,037974684	F7	6
900	05:40	21:35	16	59	3,706806283		
Total			627,63333	3954	6,299856604		260

**Anexo 1 – Dados Operacionais da Frota da STCP no primeiro trimestre de 2020 e 2021.** Fonte: Relatório de Contas terceiro trimestre de 2021 STCP

Oferta	unid.	Mensal				Acumulado			
		jun/21	jun/20	var. abs.	var. %	jun/21	jun/20	var. abs.	var. %
<b>Veículos Km Serviço</b>	10 <sup>3</sup>	1 924	1 727	197	11%	11 084	10 687	397	4%
Carro Elétrico	10 <sup>3</sup>	9	12	-3	-26%	33	45	-12	-28%
Autocarro	10 <sup>3</sup>	1 915	1 715	200	12%	11 052	10 642	409	4%
Produção própria		1 830	1 715	115	7%	10 874	10 642	232	2%
Subcontratação		85	0	85	-	177	0	177	-
<b>Lugares Km</b>	10 <sup>3</sup>	155 632	152 409	3 223	2%	932 666	949 964	-17 299	-2%
Carro Elétrico	10 <sup>3</sup>	366	497	-132	-26%	1 371	1 893	-521	-28%
Autocarro	10 <sup>3</sup>	155 267	151 912	3 355	2%	931 295	948 072	-16 777	-2%
<b>Lotação média</b>	10 <sup>3</sup>	81	88	-7	-8%	84	89	-5	-5%
Carro Elétrico	10 <sup>3</sup>	42	42	0	0%	42	42	0	0%
Autocarro	10 <sup>3</sup>	81	89	-7	-8%	84	89	-5	-5%
<b>Horas Serviço</b>	10 <sup>3</sup>	120	108	12	11%	697	667	29,49	4%
Carro Elétrico	10 <sup>3</sup>	1	1	-0,4	-26%	3,8	5,1	-1,3	-26%
Autocarro	10 <sup>3</sup>	119	106	12	12%	693	662	31	5%
<b>Taxa Ocupação</b>	%	11,2%	8,3%	3 pp	35%	8,68%	9,6%	-0,9 pp	-10%
Carro Elétrico	10 <sup>3</sup>	10%	2,8%	7 pp	264%	4,9%	11,2%	-6,3 pp	-56%
Autocarro	10 <sup>3</sup>	11,2%	8,3%	3	35%	8,7%	9,6%	-0,9 pp	-9%
<b>Velocidade Média</b>	km/h	16,1	16,1	0,0	0%	15,9	16,0	-0,1	-1%
Carro Elétrico	km/h	8,8	8,8	0,00	0%	8,7	8,9	-0,21	-2%
Autocarro	km/h	16,2	16,2	0,00	0%	16,0	16,1	-0,12	-1%

**Anexo 2 – Níveis de CO2 emitido pela STCP nos anos de 2018 e 2019 (tep)** Fonte: Relatório de Contas ano 2020

	2018	2019
Gás Natural Instalações Fixas	49	57
Gás Natural Autocarros	22 320	22 629
Gasóleo Autocarros	11 804	11 284
Total	34 173	33 970

**Referências**

ACEA. (2018). *ACEA Report Vehicles in use Europe 2018*.

[https://www.acea.auto/files/ACEA\\_Report\\_Vehicles\\_in\\_use-Europe\\_2018.pdf](https://www.acea.auto/files/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf)

ACEA. (2021). *Passenger car fleet by fuel type, European Union*. Driving Mobility for Europe.

Adegbohun, F., von Jouanne, A., & Lee, K. Y. (2019). Autonomous battery swapping system and methodologies of electric vehicles. In *Energies* (Vol. 12, Issue 4). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/en12040667>

- Ahn, S. J., Kim, L., & Kwon, O. (2018). Korea's social dynamics towards power supply and air pollution caused by electric vehicle diffusion. *Journal of Cleaner Production*, *205*, 1042–1068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.078>
- An, K., Jing, W., & Kim, I. (2020). Battery-swapping facility planning for electric buses with local charging systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, *14*(7), 489–502. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1573939>
- Anenberg, S., Miller, J., Henze, D., & Minjares, R. (2019). *A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015*. [www.theicct.org](http://www.theicct.org)
- Anseán, D., Dubarry, M., Devie, A., Liaw, B. Y., García, V. M., & Viera, J. C. (2016). Fast charging technique for high power LiFePO<sub>4</sub> batteries: A mechanistic analysis of aging. *Power Sources*, *321*(C), 201–209.
- Anseán, D., Viera, J. C., González, M., García, V. M., Álvarez, J. C., & Antuña, J. L. (2013). High power LiFePO<sub>4</sub> cell evaluation: fast charge, depth of discharge and fast discharge dependency. *World Electr. Veh. J*, *6*(3), 653–662.
- Arkin, E. M., Carmi, P., Katz, M. J., Mitchell, J. S. B., & Segal, M. (2019). Locating battery charging stations to facilitate almost shortest paths. *Discrete Applied Mathematics*, *254*, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2018.07.019>
- Arriaga, M., Cañizares, C. A., & Kazerani, M. (2016). Long-term renewable energy planning model for remote communities. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *7*(1), 221–231. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2483489>
- Auvinen, H., Järvi, T., Kloetzke, M., Kugler, U., Bühne, J. A., Heintz, F., Kurte, J., & Esser, K. (2016). Electromobility Scenarios: Research Findings to Inform Policy. *Transportation Research Procedia*, *14*, 2564–2573. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.346>
- Aziz, M., Oda, T., & Ito, M. (2016). Battery-assisted charging system for simultaneous charging of electric vehicles. *Energy*, *100*, 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.069>
- Bak, D. B., Bak, J. S., & Kim, S. Y. (2018). Strategies for implementing public service electric bus lines by charging type in Daegu Metropolitan City, South Korea. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(10). <https://doi.org/10.3390/su10103386>
- Bi, Z., Song, L., de Kleine, R., Mi, C. C., & Keoleian, G. A. (2015). Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Applied Energy*, *146*, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.031>
- Cansino, J. M., Sánchez-Braza, A., & Sanz-Díaz, T. (2018). Policy instruments to promote electro-mobility in the EU28: A comprehensive review. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(7). <https://doi.org/10.3390/su10072507>
- Chen, H., Hu, Z., Xu, Z., Li, J., Zhang, H., Xia, X., Ning, K., & Peng, M. (2016). Coordinated charging strategies for electric bus fast charging stations. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2016-December*, 1174–1179. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779677>
- Chen, H., Hu, Z., Zhang, H., & Luo, H. (2018). Coordinated charging and discharging strategies for plug-in electric bus fast charging station with energy storage system. *IET Generation*,

- Transmission and Distribution*, 12(9), 2019–2028. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0636>
- Chen, Z., Yin, Y., & Song, Z. (2018). A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.006>
- Clairand, J. M., Arriaga, M., Canizares, C. A., & Alvarez-Bel, C. (2019). Power Generation Planning of Galapagos' Microgrid Considering Electric Vehicles and Induction Stoves. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(4), 1916–1926. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2876059>
- Clairand, J. M., Guerra-Terán, P., Serrano-Guerrero, X., González-Rodríguez, M., & Escrivá-Escrivá, G. (2019). Electric vehicles for public transportation in power systems: A review of methodologies. In *Energies* (Vol. 12, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12163114>
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2010). The impact of Charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 371–380. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036481>
- Conti, M., Kotter, R., & Putrus, G. (2015). Energy Efficiency in Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Its Impact on Total Cost of Ownership. In *Beeton, D., Meyer, G. (eds) Electric Vehicle Business Models. Lecture Notes in Mobility*.
- Cordera, R., Nogués, S., González-González, E., & dell'Olio, L. (2019). Intra-urban spatial disparities in user satisfaction with public transport services. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205829>
- Curry, C. (2017). Bloomberg New Energy Finance: *Lithium-ion Battery Costs and Market Squeezed margins seek technology improvements & new business models*.
- Dai, Q., Cai, T., Duan, S., & Zhao, F. (2014). Stochastic modeling and forecasting of load demand for electric bus battery-swap station. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(4), 1909–1917. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2308990>
- Dalla Chiara, B., Deflorio, F., Pellicelli, M., Castello, L., & Eid, M. (2019). Perspectives on electrification for the automotive sector: A critical review of average daily distances by light-duty vehicles, required range, and economic outcomes. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205784>
- Ding, H., Hu, Z., & Song, Y. (2015). Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station. *Applied Energy*, 157, 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.058>
- Doughty, D., & Roth, P. (2012). A General Discussion of Li Ion Battery Safety. *The Electrochemical Society*, 36–44.
- du Pasquier, A., Plitz, I., Menocal, S., & Amatucci, G. (2003). A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 115(1), 171–178. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00718-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00718-8)
- EEA. (2016). Transport and public health. *European Environment Agency*.

- European Commission. (2017). *A European Strategy for low-emission mobility*.  
[https://ec.europa.eu/clima/policies/transport\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en)
- FCH-JU. (2012). *Urban Buses: Alternative Powertrains for Europe*.
- Feng, W., & Figliozzi, M. (2013). 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- Feng, W., & Figliozzi, M. A. (2012). Conventional vs Electric Commercial Vehicle Fleets: A Case Study of Economic and Technological Factors Affecting the Competitiveness of Electric Commercial Vehicles in the USA. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 702–711.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.141>
- Figueiredo, J. (2016). Relatório de Contas Transportes Colectivo do Barreiro 2017: *Introdução dos Veículos a Gás Natural na frota dos Transportes Colectivos do Barreiro*.
- Foltyński, M. (2019). Sustainable Urban Logistics Plan - current situation of the city of Poznań. *Transportation Research Procedia*, 39, 42–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.006>
- Gallardo-Lozano, J., Milanés-Montero, M. I., Guerrero-Martínez, M. A., & Romero-Cadaval, E. (2012). Electric vehicle battery charger for smart grids. *Electric Power Systems Research*, 90, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.015>
- Gao, Y., Guo, S., Ren, J., Zhao, Z., Ehsan, A., & Zheng, Y. (2018). An electric bus power consumption model and optimization of charging scheduling concerning multi-external factors. *Energies*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/en11082060>
- García-Villalobos, J., Zamora, I., San Martín, J. I., Asensio, F. J., & Aperribay, V. (2014). Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 38, pp. 717–731). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.040>
- Geng, Z., Conejo, A. J., Chen, Q., Xia, Q., & Kang, C. (2017). Electricity production scheduling under uncertainty: Max social welfare vs. min emission vs. max renewable production. *Applied Energy*, 193, 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.051>
- González Ortiz, A. (2018). Air quality in Europe - 2018 report. *EEA Report*.
- Guille, C., & Gross, G. (2009a). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37(11), 4379–4390.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.053>
- Guille, C., & Gross, G. (2009b). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37(11), 4379–4390.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.053>
- Habib, S., Kamran, M., & Rashid, U. (2015). Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks - A review. In *Journal of Power Sources* (Vol. 277, pp. 205–214). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.020>

- Haidar, A. M. A., Muttaqi, K. M., & Sutanto, D. (2014). Technical challenges for electric power industries due to grid-integrated electric vehicles in low voltage distributions: A review. *Energy Conversion and Management*, 86, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.025>
- Hannah Ritchie, & Max Roser. (2017). *Air Pollution*. OurWorldInData.Org. <https://ourworldindata.org/air-pollution>
- Higuera-Castillo, E., Molinillo, S., Coca-Stefaniak, J. A., & Liébana-Cabanillas, F. (2019). Perceived value and customer adoption of electric and hybrid vehicles. *Sustainability (Switzerland)*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/su11184956>
- Kempton, W., & Tomić, J. (2005a). Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144(1), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025>
- Kempton, W., & Tomić, J. (2005b). Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144(1), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. In *Environment International* (Vol. 75, pp. 199–205). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Lah, O. (2017). Factors of Change: The influence of policy environment factors on climate change mitigation strategies in the transport sector. *Transportation Research Procedia*, 25, 3495–3510. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.265>
- Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008>
- Lajunen, A. (2018). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 172, pp. 56–67).
- Langbroek, J., Franklin, J. P., & Susilo, Y. O. (2016). The effect of policy incentives on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, 94(Energy), 94–103.
- Li, S., Li, J., Li, N., & Gao, Y. (2013). Vehicle Cycle Analysis Comparison of Battery Electric Vehicle and Conventional Vehicle in China. *SAE Technical Papers*, 11.
- Li, X., Chen, P., & Wang, X. (2017). Impacts of renewables and socioeconomic factors on electric vehicle demands – Panel data studies across 14 countries. *Energy Policy*, 109, 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.021>
- Liu, Z., Song, Z., & He, Y. (2018). Planning of Fast-Charging Stations for a Battery Electric Bus System under Energy Consumption Uncertainty. *Transportation Research Record*, 2672(8), 96–107. <https://doi.org/10.1177/0361198118772953>
- Lucas, A., Bonavitacola, F., Kotsakis, E., & Fulli, G. (2015). Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging. *Electric Power Systems Research*, 127, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.05.012>



- Macioszek, E. (2019). E-mobility infrastructure in the Górnoslasko - Zaglebiowska Metropolis, Poland, and potential for development. *Proceedings of the World Congress on New Technologies, 0*. <https://doi.org/10.11159/icert19.108>
- Makarova, I., Khabibullin, R., Mavrin, G., Zhdanov, D., Mavrin, V., Belyaev, E., & Suleymanov, I. (2015). Transition to «green» economy in Russia: Current and long-term challenges. *Journal of Applied Engineering Science, 13*(1), 1–10. <https://doi.org/10.5937/jaes13-7566>
- Mehboob, N., Restrepo, M., Canizares, C. A., Rosenberg, C., & Kazerani, M. (2019). Smart Operation of Electric Vehicles with Four-Quadrant Chargers Considering Uncertainties. *IEEE Transactions on Smart Grid, 10*(3), 2999–3009. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2816404>
- Milojević, S., Skrucany, T., Milošević, H., Stanojević, D., Pantić, M., & Stojanović, B. (2018). Alternative drive systems and environmentally friendly public passengers transport. *Applied Engineering Letters, 3*(3), 105–113. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.3.4>
- Mohamed, M., Farag, H., El-Taweel, N., & Ferguson, M. (2017). Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis. *Electric Power Systems Research, 142*, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.032>
- Mutter, A. (2019). Obduracy and change in urban transport-understanding competition between sustainable fuels in swedish municipalities. *Sustainability (Switzerland), 11*(21). <https://doi.org/10.3390/su11216092>
- Mwasilu, F., Justo, J., Kim, E.-K., Duc Do, T., & Jung, J.-W. (2014). Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34*, 501–516.
- Nitta, W. (2015). *Materials Today. Volume 18, Issue 5, June 2015, Pages 252-264*.
- Oda, T., Aziz, M., Mitani, T., Watanabe, Y., & Kashiwagi, T. (2018). Mitigation of congestion related to quick charging of electric vehicles based on waiting time and cost–benefit analyses: A japanese case study. *Sustainable Cities and Society, 36*, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.024>
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G. A., & Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid, 5*(4), 1905–1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Olsen, N., & Kliwer, N. (2020). *Scheduling Electric Buses in Public Transport: Modeling of the Charging Process and Analysis of Assumptions*. <http://www.e-bus.berlin>
- Pieltain Fernández, L., Gómez San Román, T., Cossent, R., Mateo Domingo, C., & Frías, P. (2011). Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems, 26*(1), 206–213. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133>
- Plewa, F., & Stozik, G. (2019). Energy and environmental implications of electromobility implementation in Poland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 261*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/261/1/012042>

- Qi, X., Wu, G., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. J. (2018). Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.008>
- Qin, N., Gusrialdi, A., Paul Brooker, R., & T-Raissi, A. (2016). Numerical analysis of electric bus fast charging strategies for demand charge reduction. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.014>
- Qiu, L. Y., & He, L. Y. (2017). Can green traffic policies affect air quality? Evidence from a difference-in-difference estimation in China. *Sustainability (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/su9061067>
- Rahman, I., Vasant, P. M., Singh, B. S. M., Abdullah-Al-Wadud, M., & Adnan, N. (2016). Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 58, pp. 1039–1047). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.353>
- Raslavičius, L., Azzopardi, B., Keršys, A., Starevičius, M., Bazaras, Ž., & Makaras, R. (2015). Electric vehicles challenges and opportunities: Lithuanian review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 786–800). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.076>
- Richardson, D. B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 19, pp. 247–254). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>
- Rogge, M., Wollny, S., & Sauer, D. U. (2015). Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport-A feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. *Energies*, 8(5), 4587–4606. <https://doi.org/10.3390/en8054587>
- Saighani, A., & Sommer, C. (2017). Potentials for reducing carbon dioxide emissions and conversion of renewable energy for the regional transport market - A case study - A c. *Transportation Research Procedia*, 25, 3479–3494. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.259>
- Sarker, M. R., Pandžić, H., & Ortega-Vazquez, M. A. (2015). Optimal operation and services scheduling for an electric vehicle battery swapping station. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(2), 901–910. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2331560>
- Sebastiani, M. T., Luders, R., & Fonseca, K. V. O. (2016). Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(10), 2777–2786. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2525800>
- Shafiee, S., Fotuhi-Firuzabad, M., & Rastegar, M. (2013). Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1351–1360. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2251483>
- Shen, W., Han, W., Chock, D., Chai, Q., & Zhang, A. (2012). Well-to-wheels life-cycle analysis of alternative fuels and vehicle technologies in China. *Energy Policy*, 49, 296–307. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.038>

- Skrúcaný, T., Kendra, M., Stopka, O., Milojević, S., Figlus, T., & Csiszár, C. (2019). Impact of the electric mobility implementation on the greenhouse gases production in Central European countries. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(18).  
<https://doi.org/10.3390/su11184948>
- STCP. (2019). *stcp-telatorio-contas-2019*.
- STCP. (2021a). *af\_rc\_2021\_digital*.
- STCP. (2021b). *STCP RENOVA FROTA COM 5 VIATURAS 100% ELÉTRICAS*.  
<https://www.stcp.pt/pt/noticias/stcp-renova-frota-com-5-viaturas-100-eletricas/>.
- Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Acconcia, F., Domenech, T., Ekins, P., Barletta, D., & Lettieri, P. (2016). Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach. *Chemical Engineering Research and Design*, *112*, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.07.003>
- Tan, K. M., Ramachandramurthy, V. K., & Yong, J. Y. (2016). Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 53, pp. 720–732). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>
- Teixeira, D. (2020). *“Otimização e planeamento operacional (tese de mestrado não publicada)”*
- Tögel, M., & Špička, L. (2014). Low-Emission Zones in European Countries. *Transactions on Transport Sciences*, *7*(3), 97–108. <https://doi.org/10.2478/trans-2014-0007>
- Topal, O., & Nakir, I. (2018). *Total Cost of Ownership Based Economic Analysis of Diesel, CNG and Electric Bus Concepts for the Public Transport in Istanbul City*.  
<https://doi.org/10.3390/en11092369>
- Turker, H., Bacha, S., Chatroux, D., & Hably, A. (2012). Low-voltage transformer loss-of-life assessments for a high penetration of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs). *IEEE Transactions on Power Delivery*, *27*(3), 1323–1331.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2193423>
- United Nations. (2018, May 16). *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN*. Department of Economic and Social Affairs.  
<https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Verbruggen, A., Fishedick, M., Moomaw, W., Weir, T., Nadaï, A., Nilsson, L. J., Nyboer, J., & Sathaye, J. (2010). Renewable energy costs, potentials, barriers: Conceptual issues. *Energy Policy*, *38*(2), 850–861. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.036>
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons.
- Wang, R., Wu, Y., Ke, W., Zhang, S., Zhou, B., & Hao, J. (2015). Can propulsion and fuel diversity for the bus fleet achieve the win-win strategy of energy conservation and environmental protection? *Applied Energy*, *147*, 92–103.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.107>

- Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., & Barclay, N. (2017). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *100*, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- Wang, Z., Wei, X., & Dai, H. (2016). Design and control of a 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles. *Energies*, *9*(1). <https://doi.org/10.3390/en9010010>
- Wappelhorst, S., Sauer, M., Hinkeldein, D., Bocherding, A., & Glaß, T. (2014). Potential of Electric Carsharing in Urban and Rural Areas. *Transportation Research Procedia*, *4*, 374–386. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.028>
- WeElectric. (2021, May 10). *Autocarros elétricos em Lisboa: por cada quilómetro percorrido evitam-se 1,5 kg de CO2*. MOTOR24.
- Wu, Y., Yang, Z., Lin, B., Liu, H., Wang, R., Zhou, B., & Hao, J. (2012). Energy consumption and CO<sub>2</sub> emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China. *Energy Policy*, *48*, 537–550. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.060>
- Yang, C., Lou, W., Yao, J., & Xie, S. (2018). On Charging Scheduling Optimization for a Wirelessly Charged Electric Bus System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *19*(6), 1814–1826. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2740329>
- Yang, Y., el Baghdadi, M., Lan, Y., Benomar, Y., van Mierlo, J., & Hegazy, O. (2018). Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles. *Energies*, *11*(7). <https://doi.org/10.3390/en11071716>
- Yao, E., Liu, T., Lu, T., & Yang, Y. (2020). Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, *52*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101862>
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. In *IEEE Transactions on Power Electronics* (Vol. 28, Issue 5, pp. 2151–2169). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212917>
- Zackrisson, M., Fransson, K., Hildenbrand, J., Lampic, G., & O'Dwyer, C. (2016). Life cycle assessment of lithium-air battery cells. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.104>
- Zaghib, K., Dontigny, M., Guerfi, A., Charest, P., Rodrigues, I., Mauger, A., & Julien, C. M. (2011). Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications. *Journal of Power Sources*, *196*(8), 3949–3954. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>
- Zhuge, C., Shao, C., & Li, X. (2019). A comparative study of en route refuelling behaviours of conventional and electric vehicles in Beijing, China. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(14). <https://doi.org/10.3390/su11143869>
- Zivanovic Z, & Nikolic Z. (2012). The application of electric drive technologies in city buses. *New Generation of Electric Vehicles*.