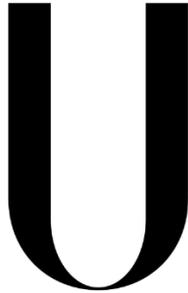


Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

**Proposta de Modelo de Análise para o Planeamento e
Viabilização dos Autocarros Elétricos em Meio Urbano –
Transição da Rede de Transportes Públicos de Lisboa**

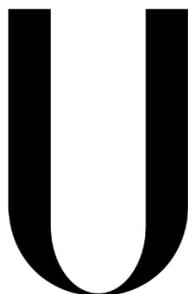
Miguel Ângelo Realista Póvoa Amaro

Dissertação de mestrado orientada pelo Professor Doutor Nuno
Manuel Sessarego Marques da Costa e pelo Professor Doutor
Paulo Alexandre Morgado Sousa

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação
Territorial Aplicados ao Ordenamento

2024

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA

**Proposta de Modelo de Análise para o Planeamento e
Viabilização dos Autocarros Elétricos em Meio Urbano –
Transição da Rede de Transportes Públicos de Lisboa**

Miguel Ângelo Realista Póvoa Amaro

Dissertação de mestrado orientada pelo Professor Doutor Nuno
Manuel Sessarego Marques da Costa e pelo Professor Doutor
Paulo Alexandre Morgado Sousa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Patrícia Catarina dos Reis Macedo Abrantes do
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

Vogais:

- Professora Doutora Maria do Rosário Maurício Ribeiro Macário do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa
- Doutora Ana Isabel Matias Louro Martins do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa
- Professor Doutor Paulo Alexandre Morgado Sousa do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

Agradecimentos

Chegando ao ponto final do meu percurso académico, queria agradecer a todos os que contribuíram de alguma forma para o desenrolar do meu trabalho de tese, bem como em todo o meu percurso académico.

Queria agradecer aos meus orientadores, o Professor Nuno Marques da Costa e o Professor Paulo Morgado, por todo o acompanhamento e auxílio na elaboração desta tese. Estiveram presentes desde o meu primeiro ano de licenciatura e assim se mantiveram até à data. Partilharam muito do seu conhecimento comigo, moldando-me positivamente, a nível profissional, àquilo que sou hoje.

Queria também agradecer à Carris e ao Sr. Eng. João Vieira, Diretor do Gabinete de Planeamento Estratégico e Inovação. Um agradecimento especial à Sra. Eng.^a Joana Cunha, pelo seu papel fundamental na elaboração deste trabalho, estando sempre disponível para dar resposta a todos os pedidos e dúvidas que foram surgindo. Agradeço aos Transportes Urbanos de Braga, em especial ao Dr. Teotónio dos Santos e o Dr. César Marques. Mostraram-se disponíveis desde o primeiro dia para a disponibilização de dados e informação, e para qualquer auxílio à elaboração desta dissertação. Sem o auxílio e disponibilidade de ambas as operadoras, este trabalho não teria sido possível.

Queria agradecer à Sofia, que me acompanhou no meu percurso e muito me ajudou a ser a pessoa que sou hoje. Queria agradecer a toda a minha família, em especial à minha mãe, que sempre me apoiou e proporcionou todas as oportunidades para estudar e aprender.

Por último, agradeço aos meus amigos e colegas, por toda a sua paciência, dedicação e disponibilidade para comigo.

Declaração de Autoria

Eu Miguel Ângelo Realista Póvoa Amaro, declaro que a presente dissertação de mestrado intitulada *Proposta de Modelo de Análise para o Planeamento e Viabilização dos Autocarros Elétricos em Meio Urbano – Transição da Rede de Transportes Públicos de Lisboa*, é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas na bibliografia ou outras listagens de fontes documentais, tal como todas as citações diretas ou indiretas têm devida indicação ao longo do trabalho segundo as normas académicas.

Resumo

O presente trabalho aborda a problemática da mobilidade urbana sustentável, em particular a transição e eletrificação de frotas de transportes públicos, e a sua implementação em Lisboa. Dada a preocupação em transformar os meios urbanos em áreas mais sustentáveis, atenuando as emissões atmosféricas, foram estabelecidos o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Perante a necessidade de cumprir as metas estabelecidas, foram implementadas em Lisboa as Zonas de Emissões Reduzidas, potenciando a transição para veículos de emissões reduzidas ou nulas. No entanto, existe uma grande necessidade de ferramentas de apoio a esta transição.

O objetivo principal deste trabalho é a proposta de um modelo de estimação de consumos de autocarros elétricos a bateria, com vista à criação de uma análise detalhada e precisa da área de operação da Companhia Carris de Ferro de Lisboa, utilizando Sistemas de Informação Geográfica. Apresenta-se também, pela primeira vez, uma caracterização da eletrificação das frotas nos principais centros urbanos de Portugal.

Com base nos resultados do modelo desenvolvido, pré-validados na área de operação dos Transportes Urbanos de Braga, concluiu-se ser uma ferramenta precisa para a estimação de consumos e na transição para autocarros elétricos. Todas as carreiras de tipologia de veículos *standard* existentes da Carris, foram classificadas e modeladas quanto ao seu potencial de transição. Destaca-se a capacidade adaptativa do modelo, pela sua aplicação em diferentes áreas de operação e tipologias de frota. A utilização de Sistemas de Informação Geográfica revelou-se crucial no planeamento e gestão de frotas, proporcionando uma visualização detalhada dos consumos ao longo da operação. Adicionalmente, foi possível a classificação de carreiras onde a transição direta é possível.

Este estudo contribuiu para o avanço na compreensão da mobilidade urbana sustentável, apresentando um modelo robusto e adaptável na transição eficiente para frotas elétricas.

Palavras-chave

Autocarros Elétricos em Portugal; Cálculo de Consumos; Mobilidade Elétrica Urbana; Sistemas de Informação Geográfica (SIG); Carris

Abstract

This thesis addresses the issue of sustainable urban mobility, in particular the transition and electrification of public transport fleets, and its implementation in Lisbon. Given the concern to transform urban environments into more sustainable areas by reducing atmospheric emissions, the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals have been established. Faced with the need to fulfil the targets set, Low-Emission Zones have been implemented in Lisbon, strengthening the transition to low or zero-emission vehicles. However, there is a great need for tools to support this transition.

The main aim of this work is to propose a consumption estimation model for battery-electric buses, with application in the area of operation of Companhia Carris de Ferro de Lisboa, using Geographic Information System. Furthermore, a characterisation of the electrification of fleets in Portugal's main urban centres is, for the first time, done.

Based on the results from the developed model developed, pre-validated in the area of operation of Braga Urban Transport, it was concluded that it is an accurate tool to help estimate consumption and the transition to electric buses. All Carris' standard vehicle type routes were classified and modelled according to their transition potential. The model's adaptive capacity stands out, allowing it to be applied to different areas of operation and fleet types. The use of Geographic Information Systems proved crucial in fleet planning and management, providing a detailed visualisation of consumption throughout the operation. In addition, it was possible to classify routes where direct transition is possible.

This study contributes to advancing the understanding of sustainable urban mobility, presenting a robust and adaptable model for the efficient transition to electric fleets.

Keywords

Electric Buses in Portugal; Consumption Estimation; Urban Electric Mobility; Geographical Information Systems (GIS); Carris

índice

I.	Introdução.....	1
I.1.	Visão geral	1
I.2.	Motivações e objetivos.....	2
I.3.	Metodologia	3
I.4.	As emissões no setor dos transportes	5
I.5.	Medidas de atenuação de emissões e descarbonização dos transportes na União Europeia	7
I.6.	Medidas de atenuação de emissões e descarbonização dos transportes em Portugal	9
II.	Revisão de literatura.....	11
II.1.	Vantagens e desvantagens dos autocarros elétricos	14
II.2.	Fatores de consumo e implementação dos autocarros elétricos.....	15
II.3.	Cálculo de consumos nos autocarros elétricos	16
II.3.1.	Modelos algébricos	17
II.3.2.	Modelos de Machine Learning	18
II.3.3.	Os Sistemas de Informação Geográfica	20
III.	Mobilidade elétrica rodoviária no transporte coletivo de passageiros	22
III.1.	Mobilidade elétrica de transporte de passageiros no panorama mundial....	24
III.2.	Mobilidade elétrica de transporte de passageiros em Portugal	26
III.2.1.	O caso de Guimarães – Guimabus.....	27
III.2.2.	O caso de Lisboa – Companhia Carris de Ferro de Lisboa	30
III.2.3.	O caso de Braga – Transportes Urbanos de Braga.....	33
III.2.4.	Outras áreas urbanas de Portugal	36
IV.	Caso de estudo: Aplicação do modelo de análise.....	39
IV.1.	Aquisição de dados.....	42
IV.1.1.	Braga.....	42
IV.1.2.	Lisboa.....	43
IV.2.	Tratamento de dados.....	45
IV.3.	Criação de informação.....	46
IV.4.	Proposta de modelo de cálculo.....	48
V.	Resultados.....	51
V.1.	Braga	51
V.2.	Lisboa	63

VI. Considerações finais e trabalho futuro	72
Referências bibliográficas.....	76

Índice de figuras

Figura 1 – Modelo concetual da metodologia utilizada.....	4
Figura 2 – Histórico de emissões e projeções de GEE, provenientes dos transportes na EU, 1990-2040.....	5
Figura 3 – Histórico de emissões, e projeções, de GEE provenientes dos transportes na UE, por modo de transporte e cenário – 1990-2040	6
Figura 4 – Word cloud das 60 palavras mais usadas dos títulos, abstract e keywords dos artigos selecionados	13
Figura 5 – O primeiro trolleybus, Halensee (Alemanha) Fonte: Siemens – On the road with electric power	22
Figura 6 – Registos de autocarros eléctricos em todo mundo, 2015-2022	25
Figura 7 – Número de veículos eléctricos matriculados (valores acumulados) em Portugal	26
Figura 8 – Autocarros midi e standard, respetivamente, da Guimabus.....	28
Figura 9 – Carregamento de autocarro mini na central de camionagem	29
Figura 10 – Autocarro standard CaetanoBus e.CityGold da carreira 706 da Carris, 2022 Fonte: Francisco Malveiro Lino.....	31
Figura 11 – Autocarro standard CaetanoBus e.CityGold. adquirido em 2018, TUB - 2023.....	34
Figura 12 – Autocarro standard CaetanoBus e.CityGold da Aveirobus, 2023	37
Figura 13 – Percursos de todas as linhas operadas pelos Transportes Urbanos de Braga em 2022	39
Figura 14 - Percursos de todas as linhas operadas pela Carris Ferro de Lisboa em 2022.....	40
Figura 15 – Linhas operadas por autocarros eléctricos a bateria dos Transportes Urbanos de Braga, 2022.....	51
Figura 16 – Consumos estimados, em intervalos de ≈ 250 metros, da saída do depósito e na operação de um sentido – Linha 96 dos TUB, 2022	55
Figura 17 – Consumos estimados com velocidades médias de 15 km/h, de um percurso de saída do depósito e um sentido de operação – Linha 43 dos TUB, 2022	56
Figura 18 – Consumos estimados com velocidades médias de 14,999 km/h, de um percurso de saída do depósito e de um sentido de operação – Linha 43 dos TUB, 2022	57
Figura 19 – Consumos estimados no modelo de SIG – Linha 706 da Carris, 2022.....	65
Figura 20 – Cinco linhas da Carris com os menores consumos estimados, a partir do modelo SIG – 2022.....	68

Figura 21 – Cinco linhas da Carris com os maiores consumos estimados, a partir do modelo SIG – 2022.....	70
--	----

Índice de quadros

Quadro 1 – Evolução das emissões dos setores do sistema energético, 2005 - 2050 .. 9	
Quadro 2 – Resultado das <i>queries</i> utilizadas na revisão sistemática da literatura, sobre três repositórios de artigos científico, à data de 31 de dezembro de 2022	12
Quadro 3 – Número de autocarros elétricos, por cidade, em Portugal, à data de 30 de junho de 2023	38
Quadro 4 – Velocidades médias em serviço de todos os veículos elétricos dos TUB, 01-31 de outubro de 2022.....	52
Quadro 5 – Consumos estimados, referentes a outubro de 2022, e consumos reais a 03 de outubro de 2022 para todas as linhas eletrificadas dos TUB	53
Quadro 6 – Consumos estimados no modelo SIG e consumos reais apurados pela operadora e extraídos da plataforma Viriciti, de 01 a 31 de outubro de 2022.....	54
Quadro 7 – Consumos estimados a partir de velocidades médias sintéticas, e respetivas diferenças entre si – Linha 43 dos TUB, 2022.....	56
Quadro 8 – Consumos estimados a partir de velocidades médias sintéticas, e respetivas diferenças entre si – Linha 96 dos TUB, 2022.....	57
Quadro 9 – Correlação de Pearson entre os consumos e a parametrização do modelo de base	58
Quadro 10 – Consumos estimados a partir de taxas de ocupação sintéticas – Linha 96 dos TUB, 2022.....	59
Quadro 11 – Consumos estimados com inclusão de frequências da operação e comparação com os consumos reais do histórico da Viriciti – Linha 96 dos TUB, veículo 1001 a 03 de outubro de 2022.....	60
Quadro 12 – Consumo estimado do modelo de SIG e respetivo cruzamento entre medidas de estatística descritiva referentes aos consumos reais dos veículos 1001, 1003 e 1006 dos TUB – dias úteis de outubro de 2022	62
Quadro 13 – Consumos estimados do modelo de base e média dos consumos estimados dos modelos de análise de sensibilidade, em kWh/km, para todas as linhas dos TUB – outubro de 2022.....	62
Quadro 14 – Comparação entre os consumos estimados no modelo SIG e no modelo de simulação desenvolvido no âmbito do projeto eULTIMATE, referentes à linha 706 – 2022.....	64
Quadro 15 – Consumos estimados do modelo de SIG e média dos consumos estimados dos modelos de análise de sensibilidade, em kWh/km, para a linha 706 – outubro de 2022.....	65

Quadro 16 – Consumos estimados e reais da operação da carreira 706, em kWh, referentes ao dia 03 de outubro de 2022.....	66
Quadro 17 – Cinco carreiras da Carris com os menores consumos estimados – 2022	67
Quadro 18 – Cinco carreiras da Carris com os maiores consumos estimados – 2022	69

Lista de siglas, acrónimos e abreviaturas

AEB – Autocarros Elétricos a Bateria

AEMH – Autocarros Elétricos Movidos a Hidrogénio

EEA – Agência Europeia do Ambiente

GEE – Gases de Efeito de Estufa

IMT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes

INE – Instituto Nacional de Estatística

kWh – Quilowatt hora

MDE – Modelo Digital de Elevação

ODS – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

PT – Posto de Transformação

TUB – Transportes Urbanos de Braga

UE – União Europeia

W – Watt

ZER – Zonas de Emissões Reduzidas

Lista de conceitos

Carregamento de oportunidade – carregamento rápido, nas paragens, durante tempos de embarque e/ou espera (Gormez *et al.*, 2021);

Chapa – conjunto de serviços atribuídos, num determinado dia, a um motorista ou a um veículo (Lousa, 2012);

Carreira ou linha – percurso, estipulado num horário, percorrido no âmbito da operação;

Diagramas de carga – representação da distribuição e ocupação de passageiros, por sentido, numa extensão de análise (Costa *et al.*, 2022);

Estação (ou depósito/parque) – local onde são armazenados os autocarros no final da operação;

Transporte em vazio ou vazios – Percursos de recolha e ida para os depósitos sem passageiros alocados;

Velocidade comercial – resulta da relação entre a distância percorrida e a duração total do percurso, considerando trânsito, tempos de paragens, intersecções ou outros impedimentos (IMTT, 2011);

Velocidade de exploração – Velocidade média em que cada veículo circula (MOPTC, 2010);

Terminal – paragem final de cada carreira ou percurso.

I. Introdução

I.1. Visão geral

Em Lisboa, a criação das Zonas de Emissões Reduzidas (ZER), em 2011, evidenciou um forte compromisso do município para a redução de emissões de poluentes oriundas da circulação de veículos (Câmara Municipal de Lisboa, 2011). Sobre estas zonas, a tendência evidente será a substituição de veículos a combustível fóssil por veículos de emissões reduzidas. Paralelamente, a contínua promoção da utilização dos transportes públicos, também com o objetivo de responder à procura de alternativas de mobilidade mais sustentáveis, faz destes meios de transporte urbanos fortes candidatos para uma transição para frotas mais sustentáveis e que visem responder à necessidade de atenuação permanente de emissões de gases e partículas poluentes.

Uma potencial alternativa para uma mobilidade urbana mais sustentável é a utilização de alternativas aos veículos a combustível, como os modos ativos e suaves, a utilização de biocombustíveis e os veículos elétricos. A eletrificação de frotas de transportes públicos apresenta-se como uma opção mais sustentável, alocando-se estes veículos às ZER e reduzindo ainda mais as emissões nessas áreas. Um dos principais fatores limitantes na transição e implementação desses veículos prende-se com autonomia e os consumos inerentes a toda a operação. É necessária uma análise detalhada da sua performance em operação, com vista a estimar os consumos, garantir a transição bem-sucedida e uma operação eficiente. O processo de decisão exige uma avaliação exaustiva das possíveis soluções do ponto de vista técnico, operacional e económico, sob as condições existentes de operação (Krawiec, 2020).

Este trabalho propõe um modelo de estimação de consumos para autocarros elétricos a bateria, com base em metodologia SIG. Pretende-se criar um modelo para o apoio à transição dos autocarros elétricos, que serve para estimar e planear o processo de implementação e da sua operação. O caso de estudo principal aqui apresentado é a área de operação da Carris de Ferro de Lisboa, estimando os consumos e identificando as carreiras com potencial de eletrificação. Para avaliar a viabilidade do modelo efetuou-se a modelação sobre operação dos Transportes Urbanos de Braga (TUB). Face à ausência de dados agregados sobre o estado da eletrificação de frotas de transportes públicos em Portugal, realizou-se um levantamento exaustivo destas frotas para as principais cidades do país. Procurou-se ainda identificar fatores de consumo, vantagens e desvantagens dos autocarros elétricos com base numa revisão da literatura.

I.2. Motivações e objetivos

No Acordo de Paris é decretado que devem efetuar-se reduções rápidas nas emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) com base nos melhores dados científicos e ciência disponível, de modo a alcançar um equilíbrio nas emissões, com base na equidade e no contexto do desenvolvimento sustentável (UN, 2015a). Para mais, o Objetivo 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis, dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidos pela Organização das Nações Unidas, nomeadamente os 11.21 e 11.6, declaram que até 2030 “proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária através da expansão da rede de transportes públicos” (UN, 2015b, p. 21) e “reduzir o impacto ambiental negativo per capita nas cidades, incluindo prestar especial atenção à qualidade do ar” (UN, 2015b, p. 22), respetivamente.

Com base nas metas delineadas nos ODS e no Acordo de Paris, relacionadas com a promoção da mobilidade sustentável e redução de emissões nos centros urbanos, assentou-se a motivação deste trabalho. Quanto à seleção das áreas de estudo, a escolha da Carris adveio da sua área de operação, em Lisboa, conter as únicas duas ZER em Portugal. A escolha da cidade de Braga, com a operadora TUB, deveu-se à sua experiência e *know how* na operação de autocarros elétricos.

O primeiro objetivo deste trabalho será analisar e caracterizar a mobilidade urbana elétrica de transportes públicos, em Portugal. Como objetivo principal pretende-se criar uma ferramenta de apoio ao planeamento para as operadoras, como ferramenta estratégica que desempenhe um papel crucial no planeamento e gestão de frotas elétricas. Propõe-se também analisar e avaliar que papel os SIG têm, e podem vir a ter, como ferramenta de apoio e planeamento à transição e implementação dos autocarros elétricos em meio urbano.

I.3. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho assenta em quatro fases. Numa primeira fase, descrita nos capítulos II e III, adquiriu-se os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da temática. A segunda fase prende-se essencialmente na recolha, tratamento e validação da informação, e com a morfologia do modelo utilizado, descrito no capítulo IV. Na terceira e quarta fase, referentes aos capítulos IV e V, respetivamente, é apresentada toda a modelação com a avaliação da predição do modelo e respetiva análise de resultados. No capítulo VI elaboram-se as considerações finais, trabalho futuro e conclusões resultantes deste trabalho.

Do ponto de vista da precisão do modelo, toda a informação geográfica criada foi vetorizada à escala de 1:1 000, considerando-se adequada face às dimensões das áreas de estudo. Toda a informação espacial foi tratada, criada e modelada com o *software* ArcGIS PRO. A informação alfanumérica, incluindo a da informação espacial, foi armazenada e representada com três casas decimais, à exceção de campos com coordenadas geográficas.

Na dimensão temporal, os resultados da modelação pretendem simular os dias úteis do mês de outubro de 2022. Para efeitos de síntese, a figura 1 apresenta o modelo concetual da metodologia utilizada.

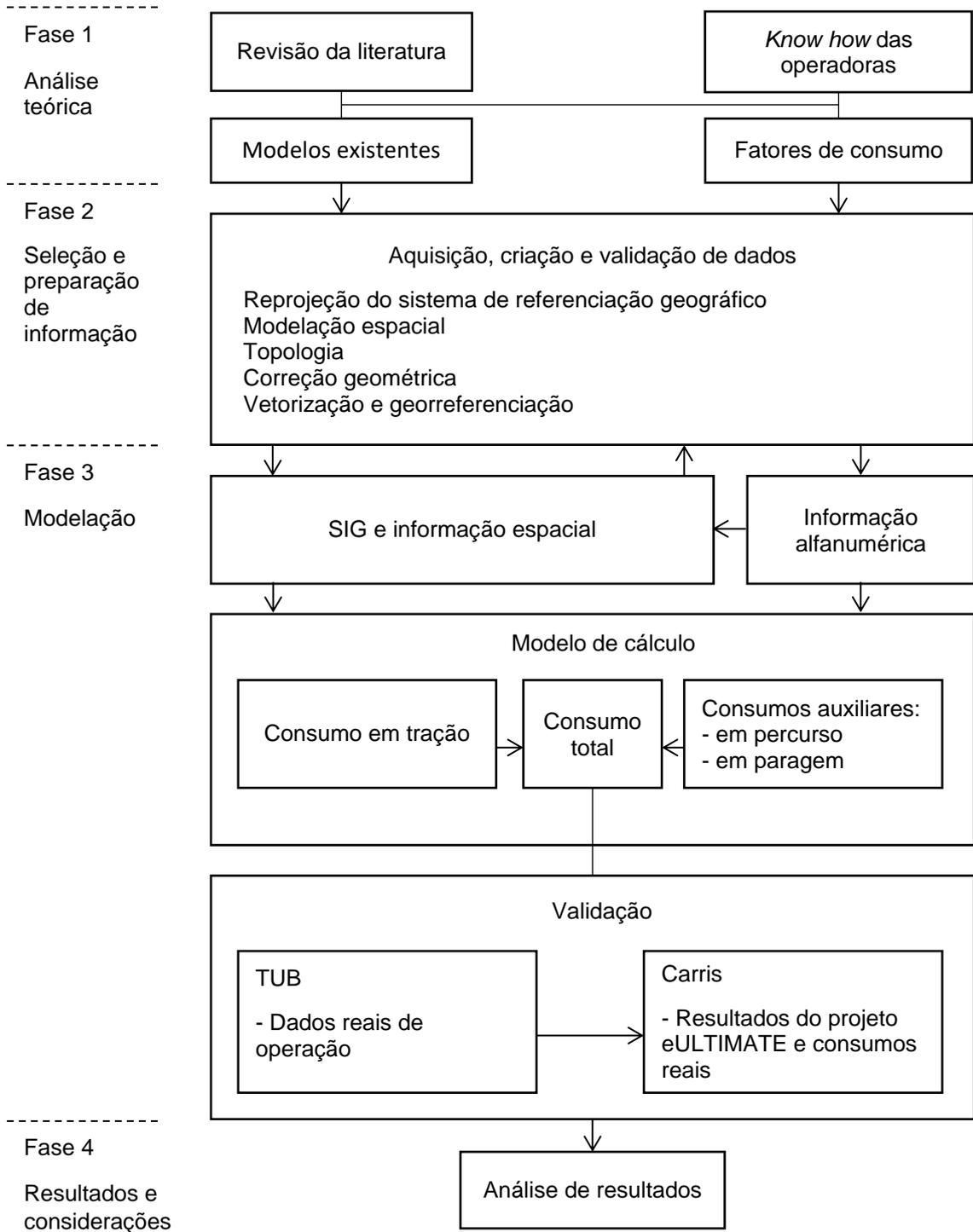
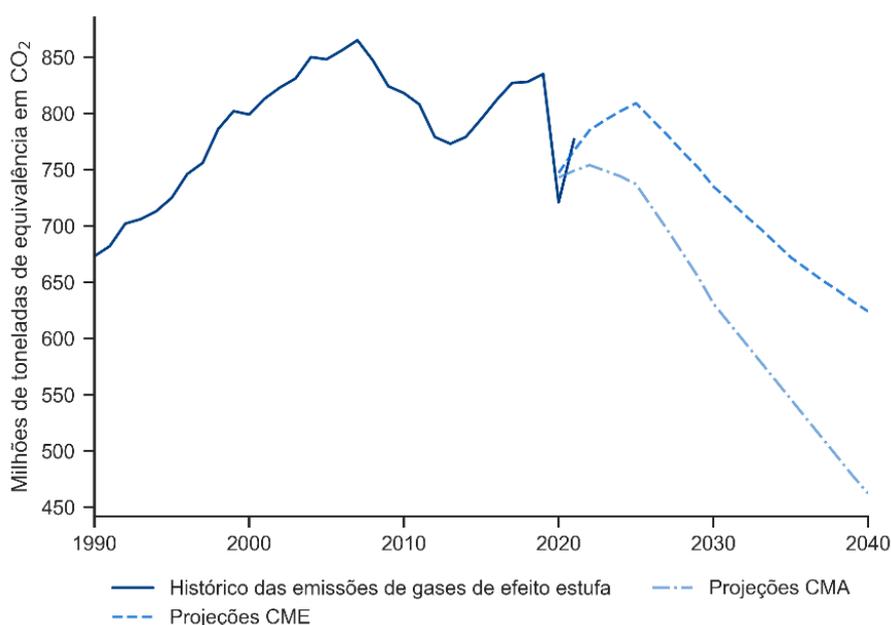


Figura 1 – Modelo concetual da metodologia utilizada

I.4. As emissões no setor dos transportes

Para melhor analisar a situação das emissões no setor dos transportes na União Europeia (UE), recorreu-se a dados da Agência Europeia do Ambiente (EEA). A figura 2 mostra a tendência das emissões de GEE nesse setor. Os valores apresentados incluem todas as emissões do sector dos transportes nacionais, excluindo a aviação, o transporte marítimo internacional e as emissões associadas à produção de eletricidade utilizada no setor (comboios, eléctricos e veículos eléctricos). Os cenários "com as medidas existentes (CME)" refletem as políticas e medidas implementadas à data de referência dos dados, e o cenário "com medidas adicionais (CMA)" inclui também outras políticas e medidas que os Estados-Membros planeiam aplicar.



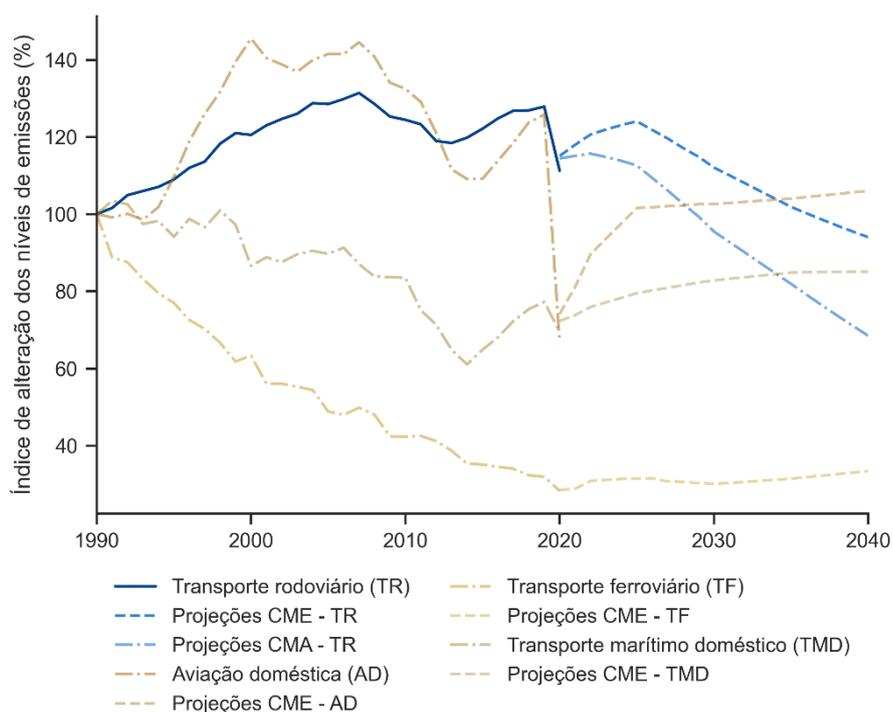
Fonte: EEA (26 de outubro de 2022)

Figura 2 – Histórico de emissões e projeções de GEE, provenientes dos transportes na EU, 1990-2040

Considerando todo o histórico das emissões de GEE, a média total foi de $\approx 787,47$ milhões de toneladas emitidas. Desde 1990, é notável o crescimento das emissões, atingindo o pico em 2007 com 865 milhões de toneladas (um desvio de $\approx 77,53$ milhões em relação à média). Só em 2013 é que se regista a queda mais significativa de emissões com 773 milhões (uma redução de $\approx 8,32\%$ e um desvio de $\approx -14,47$ em relação à média), ficando ainda aquém do valor registado em 1990 por uma diferença de 100 milhões de toneladas. No entanto, desde 2013 até 2019 houve novamente um aumento gradual até ao pico de 835 milhões de toneladas ($\approx 7,43\%$ em relação a 2013 e um desvio de $\approx 47,53$ em relação à média). Em 2020, registou-se um decréscimo de emissões equivalente aos valores de 1994 e 1995. No ano seguinte,

verificou-se ainda valores abaixo da média, com 777 milhões de toneladas emitidas. Ao analisar-se as projeções, é relevante referir que em 2025, no CME, espera-se registar 809 milhões de toneladas de emissões e que só a partir desse ano, se registará um decréscimo abrupto até 2040, com 624 milhões de toneladas. Contrariamente, no CMA, esperava-se um aumento até 2022 (754 milhões de toneladas) e espera-se um decréscimo de 462 milhões de toneladas de emissões até 2040 (uma diferença de 162 milhões de toneladas).

Este tipo de análise, permitiu perceber a dimensão e o peso que o setor dos transportes tem no panorama global das emissões. Com estas métricas foi também possível avaliar a importância da implementação de medidas e metas no combate às emissões de poluentes. A figura 3, apresenta-se a tendência de alteração dos níveis de GEE no setor dos transportes. Dos modos representados, excluiu-se os modos de circulação internacional, marítimos e aviação, devido às suas características de operação.



Fonte: EEA (26 de outubro de 2022, Adaptado)

Figura 3 – Histórico de emissões, e projeções, de GEE provenientes dos transportes na UE, por modo de transporte e cenário, 1990-2040

A aviação doméstica apresentou-se como o modo com maior representatividade na totalidade dos modos apresentados. Evidenciou o maior índice de alteração em 2000, atingindo $\approx 145,49\%$. Em 2013, o transporte rodoviário torna-se o modo com maior alteração dos níveis de emissões, ultrapassando a aviação doméstica. Desde 1990

apresentou uma tendência crescente, atingindo o pico em 2007 com $\approx 131,39\%$. Nos anos seguintes, houve um decréscimo do índice, registando $\approx 118,42\%$ em 2013. O ano de 2019 apresentou um índice de $\approx 127,86\%$, seguido por uma queda de $\approx 16,62\%$ em 2020. Os índices de alteração dos níveis de emissões sucessivamente mais baixos do modo ferroviário, ao longo do período de análise, representam a contínua eletrificação do modo com a transição de locomotivas a diesel para locomotivas elétricas (Krohn *et al.*, 2009). Deste modo, será igualmente expectável que exista uma redução nas emissões com a operação de veículos rodoviários mais sustentáveis. Avaliado as projeções, percebeu-se que os cenários propostos potenciam essa redução, atingindo valores abaixo do referencial (1990) em 2037, no caso das CME, e em 2029, nas CMA.

I.5. Medidas de atenuação de emissões e descarbonização dos transportes na União Europeia

A UE definiu em 2018 o objetivo para a neutralidade climática até 2050, respondendo às metas estabelecidas no Acordo de Paris (UN, 2015a). Os estados-membros aderentes ao acordo comprometeram-se a manterem controlados os aumentos de temperatura média abaixo dos 2°C , com referência nos níveis pré-industriais, potenciando a limitação de aumentos a $1,5^{\circ}\text{C}$.

Este objetivo foi introduzido nos estados-membros europeus a partir da estratégia *Um Planeta Limpo para Todos* (Comissão Europeia, 2018). Nesta estratégia de longo prazo definiu-se que a transição europeia para economias de emissões nulas terá de ser assente sobre o sistema energético, englobando os mercados de eletricidade, gás, aquecimento/refrigeração e mobilidade, este último responsável por mais de 75% das emissões de GEE (Comissão Europeia, 2018). Essa transição, requer também a adoção de inovações tecnológicas nos setores referidos, incluindo o dos transportes. A utilização de eletricidade produzida de fontes renováveis também apresenta um grande potencial para a descarbonização dos setores, nomeadamente a utilização de energia elétrica nos transportes tanto por utilização direta, como é o caso dos autocarros elétricos a bateria, ou indireta, através da produção de combustíveis de síntese por eletrólise no caso dos autocarros elétricos movidos a hidrogénio.

Os veículos com emissões baixas, como é exemplo os veículos a gás natural, ou nulas, com sistemas de propulsão altamente eficientes, constituem a primeira vertente desta abordagem. A indústria de veículos rodoviários tem investido fortemente na criação de novas tecnologias para alternativas com emissões nulas, como é o caso dos veículos elétricos (Comissão Europeia, 2018). A combinação de energia limpa, com baterias mais eficientes e sustentáveis e sistemas de propulsão elétrica altamente

eficientes, proporciona perspetivas de descarbonização com fortes benefícios globais, incluindo a redução da poluição sonora e atmosférica, importantes para os meios urbanos, onde 75% da população da UE habita (Comissão Europeia, 2018). Esta transição de paradigma no setor dos transportes exige ainda a utilização de infraestruturas, como estações de carregamento, que permitam a prestação de serviços transfronteiriços e sem descontinuidades.

Nesta estratégia são ainda referidas outras propostas de reestruturação, e potenciais alternativas, para os restantes modos de transporte das áreas urbanas. Esta remodelação tem como objetivo melhorar todos os transportes urbanos, potenciando os seus benefícios ao nível da sustentabilidade e promovendo sempre a multimodalidade. A UE pretende assim implementar meios urbanos de transportes rodoviários com emissões nulas, promovendo a multimodalidade e a transição para modos mais sustentáveis, recorrendo a tecnologias e combustíveis avançados, e investir numa infraestrutura de mobilidade moderna (Comissão Europeia, 2018).

Em 2019, no âmbito do Pacto Ecológico Europeu (Comissão Europeia, 2019), destacaram-se os impactos que o setor dos transportes tem nas emissões, reforçando as metas propostas e estabelecidas na estratégia anteriormente referida. Foi implementada uma nova estratégia que visa o crescimento e transformação para sociedades por forma a serem mais eficientes na utilização dos recursos, mantendo a meta da descarbonização até 2050. No documento é referido que os transportes são responsáveis por um quarto das emissões de GEE da UE. Para alcançar a neutralidade climática, estima-se que seja necessária uma redução de 90 % das emissões de todos os modos de transportes até 2050. Refere ainda que sustentabilidade dos transportes é assumida por colocar os utilizadores em primeiro lugar e proporcionar alternativas mais acessíveis, baratas, saudáveis e limpas em comparação com as operações atuais. É referido também que em 2025 existam 13 milhões de veículos de baixas, ou neutras, emissões em toda a UE, os quais necessitarão de cerca de um milhão de estações públicas de carregamento e abastecimento. No âmbito dos transportes públicos, é apresentada a necessidade de criação de medidas com foque nos congestionamentos das áreas urbanas e abranja a redução das emissões nestes modos.

I.6. Medidas de atenuação de emissões e descarbonização dos transportes em Portugal

O primeiro compromisso nacional, no âmbito da redução de emissões poluentes, foi definido no Protocolo de Gotemburgo (UNECE, 2005). Também conhecido como *Protocolo de redução da acidificação, da eutrofização e do ozono troposférico*, este protocolo teve como objetivo definir limites de emissões, por cada país dos estados-membros, até ao ano de 2010. No âmbito do setor dos transportes, foram estabelecidas metas que passavam pela utilização, promoção e aumento da oferta e procura de sistemas de transportes, e combustíveis, menos poluentes, criação de sistemas de gestão para a redução do tráfego rodoviário, utilização de energias renováveis e energias mais eficientes (UNECE, 2005).

A nível nacional, foi criado o *Roteiro Para A Neutralidade Carbónica 2050* (RNC2050) (APA, 2019) com a definição de uma estratégia, a longo prazo, para atingir neutralidade carbónica definida no Acordo de Paris (UN, 2015) e no Pacto Ecológico Europeu (Comissão Europeia, 2019), identificar os vetores de descarbonização e estimar o potencial de redução de emissões dos vários setores económicos, nomeadamente a mobilidade e os transportes.

Na década 2007-2017, as emissões médias anuais nacionais foram de 69 milhões de toneladas de CO₂, com uma desagregação de 25% no setor dos transportes, e a mesma percentagem para o setor da produção de energia elétrica, correspondendo a um dos maiores crescimentos de emissões nas últimas décadas. (APA, 2019). 96% das emissões do setor é representado pelo modo rodoviário, onde as taxas de utilização dos transportes públicos são relativamente baixas (lotações médias entre 17% a 24%) (APA, 2019). Face a esta realidade, foi projetado no RNC2050 (APA, 2019) que o setor dos transportes apresentará, em 2050, uma redução de 98% das emissões face ao ano de 2005, como apresentado no quadro 1. Como observado, prevê-se que será o setor com a maior redução de emissões, apresentando a maior redução entre 2030 e 2040.

Quadro 1 – Evolução das emissões dos setores do sistema energético, 2005 - 2050

Setor	2005	2015	2030	2040	2050	2050/2005
Eletroprodutor	23,04	16,01	1,18 2,20	0,36	0,17	-0,99%
Indústria	18,34	12,73	9,48 8,72	7,34 7,60	4,99 5,11	-73% -72%
Transportes	19,59	16,19	10,61 11,18	3,19 2,91	0,47 0,42	-98%
Agricultura	1,45	1,14	1,12 1,15	1,09 1,08	1,08 0,97	-26% -33%

Fonte: RNC2050 (06 de junho de 2019, adaptado)

Os principais vetores identificados para a descarbonização no setor dos transportes, definidos no RNC2050 (APA, 2019), passam por: **1 - Mobilidade ativa e suave**, articulados com a utilização do sistema de transportes públicos; **2 - Hidrogénio e biocombustíveis**, com um papel fundamental na substituição dos combustíveis fósseis; **3 - Maior eficiência e reforço dos sistemas de transporte público**, privilegiando-o através do reforço da oferta e da descarbonização das frotas, recorrendo a tecnologias sustentáveis, mobilidade elétrica e outras tecnologias de zero emissões, integrando a multimodalidade; **4 - Eletrificação**, que permitirá a transição relativamente rápida dos veículos atuais, de motores de combustão interna, para os veículos elétricos, assegurando mais de 30% da utilização em mobilidade em 2030, e com um potencial de atingir 100% em 2050.

A eletrificação da mobilidade urbana apresenta-se como uma grande alternativa para a descarbonização do setor, onde se prevê que o gasóleo deixará de ser custo-eficaz até 2030 e a gasolina até 2040, e ambos substituídos por veículos elétricos, no caso dos transportes ligeiros de passageiros (APA, 2019). Com a integração das energias renováveis, permitirá uma transição mais rápida e sustentável dos modos rodoviários a combustíveis fósseis, prevendo-se um peso de 70% do consumo energético total, no setor dos transportes, em 2050 (APA, 2019). Nos transportes públicos, é referida a importância da substituição dos veículos de combustíveis fósseis por uma frota essencialmente elétrica, apresentando-se assim como uma grande alternativa e necessidade de investimento nas tecnologias de propulsão elétrica. Em todo o setor dos transportes está previsto um investimento de cerca de 40% do total de orçamento para a redução de emissões (APA, 2019).

II. Revisão de literatura

No ponto de vista da elaboração e compreensão deste trabalho, identificou-se a necessidade de adquirir informação mais detalhada e precisa sobre as características dos autocarros elétricos, os fatores de influência no seu consumo, vantagens e desvantagens da sua operação e conhecer o estado da arte no cálculo dos consumos para autocarros elétricos. Procedeu-se então a uma revisão sistemática da literatura, baseada em pesquisa por *queries* para obter todos os artigos científicos relativos ao tema. Todos os artigos foram extraídos até à data de 31 de dezembro de 2022.

A pesquisa foi feita nos repositórios *Web of Science*, *IEEE Xplore* e *Scopus*. Optou-se pela pesquisa em inglês, devido ao maior número de artigos desenvolvidos. A escolha das *queries* sofreu uma análise exaustiva, de modo a obter os artigos pretendidos para o tema e objetivos deste trabalho. Todas as pesquisas realizadas tiveram por base a procura das *queries* no título, resumo e palavras-chave dos artigos.

As *queries* utilizadas, bem como os resultados obtidos são apresentados no quadro 2. À esquerda da barra, está o número de artigos selecionados, e à direita, o resultado total de artigos disponíveis. O racional por de trás da escolha de cada *querie* é desenvolvido de seguida.

A utilização da palavra *transport* invés de *transportation*, baseou-se em critérios linguísticos, utilizando-se, na maioria dos casos, *public transport* invés de *public transportation*. A *querie transition potential* foi utilizada por forma a identificar-se o potencial, características e processos de planeamento e transição entre os veículos convencionais e elétricos. A escolha de *Electric vehicles*, em conjugação com *public transport*, teve como objetivo selecionar artigos que não recorressem à utilização do termo *electric bus*. Utilizou-se também a *querie electric bus* para isolar os artigos apenas referentes a autocarros elétricos. Com a *querie machine learning*, procurou-se conhecer e identificar os modelos mais frequentemente utilizados para o cálculo dos consumos, as respetivas parametrizações, fatores de consumo, volume de dados e intervalos de erro na estimação. Para identificar o processo de planeamento de frotas e percursos em autocarros elétricos, recorreu-se ao termo *Route planning*.

A utilização de acrónimos e terminologias por extenso também se demonstrou um fator relevante nos resultados. Incluiu-se *GIS* e *Geographic information systems*, pela obtenção de diferentes artigos em cada uma das *queries*. O mesmo verificou-se na utilização de aspas, pretendendo isolar-se apenas os artigos sobre autocarros elétricos

e SIG. No caso das restantes *queries*, quis-se obter os artigos com menor restrição para não eliminar potenciais candidatos.

Quadro 2 – Resultado das *queries* utilizadas na revisão sistemática da literatura, sobre três repositórios de artigos científicos, à data de 31 de dezembro de 2022

Query	Repositório		
	Web of Science	IEEE Xplore	Scopus
Transition potential AND Electric Vehicles AND Public Transport	31/58	8/8	38/52
Route planning AND Public transport AND Electric bus	33/43	21/22	53/55
Electric bus AND Machine Learning AND Public transport	9/14	12/12	13/13
Public transport AND Geographic information systems AND Electric bus	2/4	2/4	3/10
Public transport AND GIS AND Electric bus	2/8	0/1	4/10
“Electric bus” AND “Geographic information system”	1/2	0/0	6/9
“Electric bus” AND “GIS”	3/5	0/0	5/12

Da utilização das *queries*, obteve-se um total de 342 artigos. Numa primeira análise, todos os artigos excluídos tiveram como base as seguintes regras:

- Não diretamente relacionado com o tema;
- Artigos sem acesso;
- Principalmente técnicos na questão das baterias e dos sistemas elétricos dos autocarros.

Da seleção dos artigos com os filtros indicados, obteve-se 246 artigos. Procedeu-se a uma segunda triagem, utilizando-se os seguintes critérios de exclusão:

- Repetidos;
- Contagem de passageiros;
- Sistema de *bus tracking*;
- *Crowd/passager management*;
- Apps para *passager help/assistance*;
- Não estavam em inglês, português ou espanhol.

Deste último tratamento de artigos, resultaram assim 91 trabalhos. Desta seleção, foram lidos e selecionadas as informações mais relevante para a revisão da literatura. Na figura 4, observa-se a *word cloud* com as 60 palavras mais usadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos selecionados.

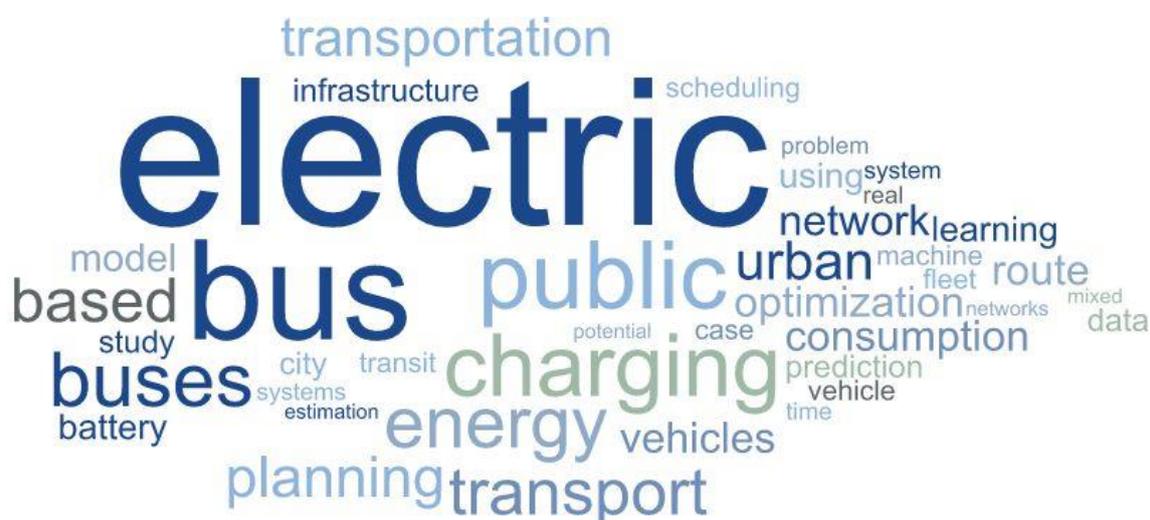


Figura 4 – *Word cloud* das 60 palavras mais usadas dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos selecionados

Analisando os resultados do *word cloud*, destacou-se com maior realce as palavras *electric* e *bus*. Os termos *charging*, *buses*, *public*, *transport* e *transportation* apresentaram-se também mais frequentemente. A ausência do termo GIS indicou a falta do uso dos SIG na estimação e planeamento de autocarros elétricos.

No seguimento da revisão sistemática realizada, dividiu-se a informação nos seguintes subcapítulos: O subcapítulo II.1 aborda-se a importância dos autocarros elétricos, apresentando os seus benefícios e problemas. Identificam-se ainda os entraves e problemas na sua implementação; No subcapítulo II.2 descrevem-se os fatores que influenciam os consumos e a regeneração de energia elétrica. Por último,

no subcapítulo II.3 abordam-se as diferentes metodologias adotadas na estimação de consumos e planeamento da implementação de autocarros elétricos.

II.1. Vantagens e desvantagens dos autocarros elétricos

Gabsalikhova *et al.* (2018) referem que os veículos são praticamente silenciosos, principalmente em velocidades mais baixas, e ausentes de vibrações, mais fáceis de operar e mais fiáveis. Beneficia-se também de menor desgaste do veículo, como o caso dos travões causada pela desaceleração por meio de travagem eletromagnética, através do processo de recuperação de energia. Indicam que a colmatação do ruído e das vibrações melhora o conforto dos passageiros e condutores. (Longo *et al.*, 2018) denotam que a capacidade de aceleração nos autocarros elétricos é superior à dos autocarros a diesel, característica evidente em rotas declivosas. Referem que em algumas situações, o número de autocarros utilizados na operação pode até ser reduzido significativamente.

De acordo com Gabsalikhova *et al.* (2018) os modos elétricos tradicionais, como os *trolleybus* e os elétricos (ferroviário), geram desconforto aos passageiros e residentes das áreas urbanas devido à vibração e ruído gerado na operação. Adicionalmente, os custos iniciais de desenvolvimento de infraestruturas são mais elevados, para além da alteração e adaptação das rotas ser restrita somando ainda a desvantagem relacionada com potenciais descarrilamentos dos elétricos. Com a transição dos modos elétricos tradicionais para autocarros elétricos revela-se uma potencial oportunidade de adaptação das redes de linha aérea de contacto para infraestruturas de carregamento por pantógrafo.

Obstante, Gabsalikhova *et al.* (2018) sinalizam que a inibição de ruído, apesar de vantajoso, apresenta um problema. O ruído gerado pelos veículos serve como um sinalizador para os peões e utilizadores do modo ciclável, permitindo a perceção de velocidade e proximidade. Posto isto, poderá verificar-se um aumento de atropelamentos e acidentes rodoviários. No entanto, já existem mecanismos de alerta para peões e outros modos ativos e suaves que sinalizam a aproximação dos veículos de tração elétrica, como é o caso dos veículos da Volvo (Gabsalikhova *et al.*, 2018).

Outro fator importante é a autonomia em comparação com os veículos convencionais a combustão (Barchański *et al.*, 2022). Nestes últimos, na sua generalidade, apresentam autonomias superiores a 300km em operações urbanas, enquanto a autonomia dos elétricos varia entre 100km e 300km, dependendo sempre das condições de condução e da capacidade das baterias (Jiang *et al.*, 2022). Como

resposta a essas autonomias, e de forma a garantir a continuidade das operações, é necessária a instalação de postos de carregamentos nos depósitos, nas paragens ou em ambas (Jiang *et al.*, 2022), fator dispendioso na implementação deste tipo de veículos. Concomitantemente, o preço de retalho dos autocarros elétricos é mais elevado em comparação com os autocarros a combustível. A conceção das baterias, componente mais caro no caso dos Autocarros Elétricos a Bateria (AEB), é a principal razão (Alarrouqi *et al.*, 2022).

II.2. Fatores de consumo e implementação dos autocarros elétricos

Perante as autonomias e necessidade de carregamentos, é fundamental a análise dos consumos para o correto planeamento das operações. Alarrouqi *et al.* (2022) referem que a maioria dos desafios operacionais e económicos colocados à adoção dos AEB, em larga escala, está relacionada com as necessidades energéticas dos veículos. Para tal, é necessário analisar os fatores de consumo nos autocarros elétricos a bateria. Dever-se-á ter em conta que dependendo do modelo e das características dos AEB, a importância e peso dos fatores de consumo poderão variar. Segundo Li *et al.* (2021a), estes fatores de consumo são categorizados em três grupos:

Condições ambientais

- Temperatura ambiente, em que a eficiência energética mais económica é entre 21,8 e 25,2°C (Li *et al.*, 2021b). No frio, as baterias de lítio apresentam um desempenho pior (Wang *et al.*, 2020);
- Condições meteorológicas, onde situações húmidas e de precipitação afetam o atrito na tração. Segundo a análise de (Li *et al.*, 2021b) apresenta pouca influência nos consumos, uma diferença de 0,04 kWh;
- Utilização de ar condicionado ou aquecimento, que na utilização do ar condicionado pode aumentar o consumo para o dobro (Longo *et al.*, 2018).

Características dos percursos

- Distância percorrida, por percurso, parâmetro importante para a introdução de autocarros elétricos (Barchański *et al.*, 2022);
- Distância paragem-depósito (Barchański *et al.*, 2022);
- Velocidade, fator com grande impacto nos consumos e inversamente proporcional em relação à distância (Li *et al.*, 2021a);
- Número de paragens, parâmetro importante nos consumos (Li *et al.*, 2021b);
- Dia da semana, variando os consumos do fim de semana e dias úteis (Wang *et al.*, 2020);
- Número de passageiros (Wang *et al.*, 2020);

- Hora de partida/operação, em horários noturnos há menos afluência de passageiros (Li *et al.*, 2021a);
- Número de semáforos, parâmetro importante nos consumos (Li *et al.*, 2021b);
- Relevo ou declividade (Barchański *et al.*, 2022);
- Estilo de condução (Wang *et al.*, 2020);
- Travagens, como fator de regeneração energética (Wang *et al.*, 2020).

Condições dinâmicas de tráfego;

- Aceleração e desaceleração (Wang *et al.*, 2020);
- Tempo da operação (Li *et al.*, 2021a);
- Situações e condições de trânsito, com o aumento do tempo de operação e respetivos atrasos (Li *et al.*, 2021b);
- Características da rede viária (Barchański *et al.*, 2022)
- Condições do pavimento (Longo *et al.*, 2018);
- Existência e circulação de faixas BUS, reduzindo a variabilidade da operação, evitando situações de congestionamento e operando em velocidades mais elevadas (Wang *et al.*, 2020).

II.3. Cálculo de consumos nos autocarros elétricos

Para o planeamento e implementação destes veículos, é fulcral o cálculo dos consumos. Unido aos consumos, está a autonomia do veículo. A consideração destas duas variáveis são fundamentais para o planeamento de toda a operação, nomeadamente os horários e carregamentos. O consumo de energia influencia a autonomia, assim como influencia o número de carregadores por depósito, periodicidade dos carregamentos, número de paragens (Li *et al.*, 2021b) e frequências por carreira. Em operações de frotas de AEB, a estimacão de consumos de energia, por carreira, é crucial (Li *et al.*, 2021b). O consumo de energia pode ser quantificado, para além dos kWh, através do indicador de *State of Charge* (SoC), que reflete a percentagem da carga energética (Wang *et al.*, 2020).

Li *et al.*, (2021a) definem que as três abordagens mais utilizadas para os modelos de estimacão de consumos em autocarros elétricos são: **Rule of Thumb** – partem do pressuposto que os consumos são constantes. Esta abordagem é maioritariamente utilizada em otimização de horários. As estimacões poderão apresentar imprecisões por não refletir a variabilidade presente nas operações; **Physic-based** – modelos que incorporam características dos veículos, características ambientais, tempo de partidas e chegadas. Estes modelos permitem a estimacão dos consumos energéticos de forma mais precisa, em comparacão com a abordagem

anterior. A incorporação de características físicas pode apresentar alguns problemas, nomeadamente no acesso e disponibilidade dos dados; **Data-driven methods** – São as abordagens mais utilizadas nos últimos anos. Nestas abordagens são utilizados modelos de *deep learning*, como redes neuronais, e modelos de regressão linear múltipla. Estes tipos de métodos revelam predições com boa performance e precisão, quando comparadas com as os métodos anteriormente apresentados.

II.3.1. Modelos algébricos

Tamaddon & Voodi (2022) criaram um método para calcular o consumo elétrico e a velocidade comercial para um perfil de percurso em Milão (Itália). Obtiveram toda a informação do percurso do autocarro, nomeadamente distâncias, ângulos e diâmetros de curvas, a partir do serviço Google Maps, e as especificações dos veículos a partir dos catálogos e revistas do fabricante. Recorreram ainda a variáveis como o peso, velocidade, aceleração, atrito, resistência ao ar, tração e travão.

Alarrouqi *et al.* (2022) analisaram a operação de autocarros elétricos no Qatar, para o Campeonato do Mundo de Futebol FIFA de 2022. Este estudo avaliou o consumo energético com dados reais dos autocarros elétricos e foi tido em conta o clima e as condições meteorológicas únicas do país, bem como o tipo de rota, comportamento do condutor e número de passageiros. Correram o modelo para os autocarros vazios, meio cheio e cheio.

Gallet *et al.* (2018) recorreram a um modelo de dinâmica longitudinal para calcular a energia consumida pelos autocarros elétricos. O modelo foi concebido para ser aplicado a grandes frotas, com recurso a dados reais, recolhidos nas operações diárias pelos operadores em Singapura. Permite classificar as linhas de autocarros em função do seu potencial de eletrificação com carregamento de oportunidade nos terminais. Esta informação pode ser utilizada pelos operadores para dar prioridade à eletrificação das linhas com maior potencial.

Benoliel *et al.* (2021) apresentaram um modelo para investigar a melhor repartição entre a carregamentos em estações e carregamentos de oportunidade, recorrendo a horários, dados dos percursos, oriundos de ficheiros GTFS, estilo de condução, cargas e ar condicionado, na Califórnia (E.U.A.). Examinaram os efeitos da interação de diversas características nas linhas de AEB e as respetivas infraestruturas, permitindo as operadoras tomarem decisões no planeamento da transição total para AEB. Identificaram que uma limitação da origem dos dados foi a ausência de informação de elevação ou declividade.

II.3.2. Modelos de Machine Learning

Li *et al.* (2021a) utilizaram modelos de *machine learning*, mais concretamente *Random Forest*, para avaliar os impactos das condições ambientais, características dos percursos e as condições de tráfego, nos consumos. Foram utilizados dados em tempo real de 1024 autocarros num total de 5 meses em Shenzhen (China). Afirmam que os consumos energéticos são não lineares, mas, que os modelos de *machine learning* permitem uma aproximação arbitrária, produzindo boa performance preditiva em estimações de consumos de energia por percurso. A utilização desta metodologia teve como principal objetivo incorporar todos os fatores definidos como potenciais, ou não, no aumento, ou redução, dos consumos de energia dos AEB. A escolha do algoritmo *Random Forest* deveu-se às suas características de criação de diferentes sets de treino, reduzindo o *overfitting* e a variância que os vários modelos de base geram, permitindo obter predições mais precisas.

Wang *et al.* (2020) recorreram a 13 algoritmos de *machine learning* para avaliar a relação entre os comportamentos de condução e os consumos dos autocarros elétricos em várias estações do ano. Desses algoritmos, foram testadas regressões lineares (*Linear Regression*, *Lasso*, *Ridge*, *Elastic Net* e *Robust Huber Regression*), métodos *kernel* (*Support Vector Machine*), métodos de redução de dimensão (PLS), métodos baseados em árvores (*Decision Tree*), métodos *ensemble* (*Random Forest*, *Boosting Trees* e *XGBoost*). e baseados em redes neuronais (*multi-layer perceptron* (MLP) e *deep neural network with dropout*). Realizou-se o cálculo de consumos com dados de 99 AEB, no período de um ano, incluindo variáveis como temperaturas médias diárias (representando as estações do ano), hora do dia, Distância por SoC (km), Velocidade Média (km/h), Desvio Padrão da Velocidade (Std.), Normalização da Aceleração Global e da Desaceleração, Início do SoC (%) e Fim do SoC (%), Dias de Semana e Fim-de-Semana. Na avaliação dos algoritmos, a partir do *Mean Square Error* (MSE), o *Random Forest* apresentou os menores erros tanto em teste como no treino.

Lin *et al.* (2020) aplicaram os modelos *Decision Trees* e *Random Forest*, com validação cruzada *k-fold*, para construir modelos analíticos de consumo de energia em Taiwan. Utilizaram dados de circulação dos veículos a partir do sistema de gestão de baterias para classificarem comportamentos de condução, fornecendo uma análise da relação entre o comportamento de condução e o consumo de energia. Utilizaram as características do veículo, dados de condução e dados do estado da bateria. Ayman *et al.*, (2020) desenvolveram um método para a predição do consumo de energia, ao nível do percurso, para uma frota de autocarros de veículos de tipologia mista (elétrico e

combustível). Aplicaram três modelos de *machine-learning* para prever o consumo de energia: redes neurais artificiais, que apresentou o melhor resultado, regressão linear e regressão por árvores de decisão. Utilizaram dados recolhidos a partir da plataforma Viriciti e recorreram à OpenStreet Map para recolher informação da rede viária e recolheram Modelos Digitais de Elevação de um ambiente SIG. Combinaram dados telemétricos dos veículos, *street-level maps*, dados meteorológicos (temperatura, humidade, visibilidade, velocidade do vento e precipitação) e dados de trânsito.

Em Liu *et al.* (2019) analisou-se o problema da otimização do consumo de energia na operação de frotas de tipologia mista e a relação entre o despacho a partir de um algoritmo genético, com vista a orientar a futura implementação dos autocarros eléctricos em Beijing (China).

Li *et al.* (2021b) utilizaram duas metodologias para a predição de perfis de velocidade, aleatórios, e dos consumos dos AEB, a partir de algoritmos de *Machine Learning*, nomeadamente *Random Forest* e *K nearest neighbour*, na cidade de Shenzhen, China. Recolheram dados das plataformas Amap, Google Maps e Baidu Maps, permitindo extrair variáveis como número de segmentos numa viagem, de paragem a paragem e respetivo comprimento, classificação da rede viária, e ainda utilizaram variáveis como aceleração e desaceleração máximas, velocidades máximas e mínimas por classificação da rede viária. Na parametrização do modelo de Random Forest, utilizaram *cross validation* de 10 fold's, com um número de árvores entre as 100 e 600. Estes parâmetros foram utilizados sobre dados de 5 meses de 228 AEB.

Pamuła & Pamuła (2022) propuseram um método para prever os consumos de energia e apoiar o planeamento das frotas de AEB, no município de Jaworzno, Polónia. Recorreram a várias configurações e tipos de redes neurais, como *Deep learning networks with an autoencoder layer* (DLNA), *Deep learning network of long short-term memory* (LSTM), *multilayer perceptron* (MLP), e um modelo de regressão linear múltipla. Para a predição dos consumos energéticos, utilizaram parâmetros como coordenadas de localização das paragens, e respetiva distância entre paragens, diferença de altitude, hora de chegada, o tempo de viagem, a energia consumida, ocupação de cada linha/percurso e as condições meteorológicas. A primeira configuração foi sobre o modelo DLNA, com um número de neurónios a variar entre 10 e 50, e uma camada de retro propagação, a variar entre 5 e 10 neurónios na camada oculta. No LSTM foi utilizada a configuração 5-200u-1 (cinco entradas, 200 unidades LSTM e 1 neurónio) e no MLP uma configuração 5-8-8-1 (cinco valores de entrada, oito neurónios na primeira camada oculta, oito neurónios na segunda camada oculta e um neurónio na camada de

saída). O resultado do modelo de regressão linear permitiu comparar os resultados dos modelos de *deep learning*.

II.3.3. Os Sistemas de Informação Geográfica

No trabalho de Ríos *et al.* (2019) realizaram uma análise comparativa dos consumos de energia, custos económicos e impactos ambientais entre autocarros a combustível fóssil e elétricos, para os transportes públicos urbanos da cidade de Ambato (Equador). Recorreram a ferramentas de SIG, nomeadamente ArcMap, para simulação de rotas de transporte urbano, tendo como foco principal a utilização das características técnicas dos autocarros fósseis e elétricos fornecidas pelos fabricantes. Assumiram que todos os autocarros convencionais a diesel, do sistema de transportes, foram modelados como autocarros elétricos. Utilizaram dois modelos de AEB, Chinese BYD e Irizar i2e, com dimensões e capacidade semelhantes às dos autocarros convencionais atualmente em uso no sistema de transportes urbanos da cidade de Ambato. Concluíram que as suas transições para autocarros elétricos minimizariam 72% no consumo de energia, 71% nas emissões poluentes e 40% nos custos económicos. Uma redução notável em comparação com o sistema de transportes atual.

Em Al-Ogaili *et al.* (2020) recorreram a ferramentas de SIG para a análise do potencial, e respetivo impacto, de implementação de AEB em frotas de grande escala, na Malásia. O principal objetivo foi criar um modelo de apoio ao planeamento na eletrificação das frotas. Recorreram a dados de elevação, a partir de um modelo digital de elevação, com objetivo de compreender os efeitos do desnível na rede viária face aos consumos. Utilizaram também dados reais de operação como o tempo, hora de partida e chegada, frequências e características dos veículos (peso do autocarro, capacidade média do autocarro, área frontal do autocarro) e o coeficiente do atrito. A realização destes cálculos foi feita a partir de fórmulas de modelos dinâmicos longitudinais.

Foram ainda encontrados alguns exemplos de outras utilizações dos SIG na implementação dos autocarros elétricos. Wei *et al.* (2018) desenvolveram um método analítico espaciotemporal para identificar a implementação ótima dos AEB e de estações de carregamento. Utilizaram uma combinação de ferramentas de SIG e outras técnicas de otimização. No caso de estudo de Emami *et al.* (2022) utilizaram os SIG para sinalizar as rotas com maior potencial de substituição e implementação dos autocarros elétricos por autocarros a diesel, através de uma análise multicritério. Ranta *et al.* (2016) criaram um conjunto de ferramentas para analisar a interação do peso dos carregamentos dos AEB nas redes elétricas. Este conjunto dividido em modelos de

pesos de ligação à rede elétrica, criação de rotas e simulação da circulação dos autocarros elétricos ao longo das rotas concebidas. Os SIG foram utilizados para a criação das rotas.

Na revisão da literatura realizada, a abordagem *Data-driven methods* demonstrou-se a mais comum e utilizada, com capacidades preditivas superiores às restantes abordagens. Porém, à semelhança da *Physic-based*, exigem uma enorme de dados para a predição de consumos.

No âmbito da utilização dos SIG, evidenciou-se uma fraca presença como ferramenta de análise e cálculo dos consumos nos AEB. Os SIG revelaram-se mais frequentemente como uma ferramenta de recolha de dados, tratamento de dados e extração de informação. Posto isto, identificou-se uma potencial lacuna a ser preenchida na utilização dos SIG no cálculo dos consumos de autocarros elétrico a bateria. Foi predominante

III. Mobilidade elétrica rodoviária no transporte coletivo de passageiros

O primeiro transporte público coletivo foi criado em 1661 por Blaise Pascal (Boonraksa *et al.*, 2020), conhecido por coche de cinco tostões (traduzido do Francês *Carosses à Cinq Sous*). Mais tarde, em 1826, foram criados o Omnibus com capacidade de quinze lugares (Boonraksa *et al.*, 2020) e em 1831, no Reino Unido, foram criados e implementados Omnibuses com serviços diários (Eckermann, 2001). Ambos, dependiam de tração animal para a sua operação.

Em 1821, Michael Faraday inventou o primeiro motor elétrico, com base na experiência de Alessandro Volta, no século XIX, com o armazenamento de energia em componentes químicos, marcando a criação da primeira bateria (Boonraksa *et al.*, 2020), iniciando-se a potencial eletrificação de veículos. O primeiro autocarro elétrico foi um *trolley bus*, (também conhecido por *Elektromote*, presente na figura 5), criado por Ernst Werner von Siemens, em 1882 (Siemens, n.d.). Apesar dos avanços tecnológicos, e com a eletrificação de veículos pessoais privados a bateria já no século XIX, existiu uma enorme dificuldade com a adaptação para veículos de maiores dimensões, devido à falta de autonomia, baixa eficiência e carregamentos extremamente lentos (Boonraksa *et al.*, 2020).

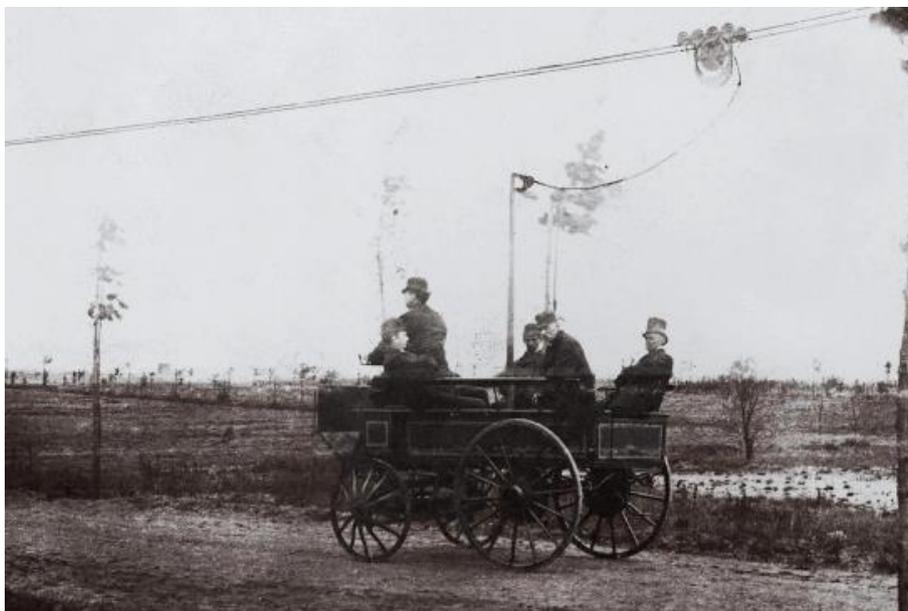


Figura 5 – O primeiro trolleybus, Halensee (Alemanha)
Fonte: Siemens – On the road with electric power

Atualmente, com os avanços tecnológicos ao nível das baterias e dos sistemas de propulsão, assiste-se a um crescimento notável da adoção de veículos elétricos, nomeadamente de autocarros. Hoje, os autocarros elétricos apresentam uma alternativa sustentável e existem muitos países a optar por este tipo de veículos. O exemplo mais notável é o da China, com investimentos por parte dos governos centrais e locais, e criação de políticas, para o apoio da eletrificação das frotas de transportes públicos (Lin *et al.*, 2019). O caso de Shenzhen, onde é sediada a BYD Auto (uma das maiores empresas de produção de autocarros da China) (Boonraksa *et al.*, 2020) alcançou a eletrificação total da frota de autocarros da cidade, detendo a maior frota de autocarros eléctricos do mundo (Lin *et al.*, 2019).

No espectro da mobilidade elétrica rodoviária, de transportes coletivos, existem três tipos de veículos (MRCagney, 2017):

Autocarros híbridos elétricos – Estes veículos utilizam um motor, geralmente a gasóleo, e um motor elétrico. Esta tipologia permite uma transição mais suave na operação porque apresentam características muito semelhantes aos autocarros tradicionais, i.e., a combustível fóssil. Apresentam uma baixa autonomia, como fraca fiabilidade e vida útil, provocada pelas temperaturas extremas oriundas do sistema de combustão. Normalmente, apresentam também uma redução na capacidade de passageiros, causado pelo peso do sistema de combustão e elétrico, restringindo também a circulação destes veículos em alguns trechos da malha urbana;

Autocarros elétricos movidos a hidrogénio – À semelhança da tipologia anterior, a produção da energia elétrica é realizada dentro do sistema de propulsão, mas com células de hidrogénio, que gera eletricidade durante funcionamento do veículo. As vantagens passam pelas extremamente baixas emissões e pouca geração de temperatura durante o funcionamento, potência personalizada, menor manutenção necessária e permite operar em longas distâncias. Contudo, a sensibilidade ao calor, impurezas e concentração de água pode gerar danos permanentes às células de hidrogénio. Para além disso, a densidade energética das células é inferior à dos combustíveis fósseis, sendo necessária um maior espaço de armazenamento para igualar a performance. Do ponto de vista económico, os preços dos veículos e das infraestruturas necessárias para a operação são ainda muito elevados;

Autocarros Elétricos a Bateria – Armazenam toda a energia elétrica necessária para a operação em baterias, a partir de carregamentos noturnos, ao longo dos percursos ou por cargas de oportunidade. Esta tipologia apresenta uma maior eficiência energética, com custos de exploração baixos e as emissões são praticamente nulas, especialmente se forem utilizadas fontes renováveis na produção da energia elétrica. Todavia, os veículos são mais pesados e a autonomia é relativamente mais baixa, apesar desta última vir a ser potencialmente colmatada com a evolução e aperfeiçoamento das baterias.

Os modos de carregamento dos autocarros elétricos, todos os que disponham de baterias, são carregados de quatro formas: **Pantógrafo**, normalmente carregados durante a operação, nas paragens (Barchański *et al.*, 2022); **Indução**, nas estradas durante a operação (Barchański *et al.*, 2022).sendo que esta tecnologia ainda não é eficiente e economicamente rentável (Wang *et al.*, 2022); **Troca de baterias**, que apresenta graves problemas de segurança, apesar do tempo de espera reduzindo (Wang *et al.*, 2022); **Plug-in**, que pode ser efetuado nos depósitos e nas paragens (Barchański *et al.*, 2022).

Em termos de custos, estado da tecnologia e eficiência, o carregamento por plug-in em depósito apresenta-se, atualmente, como o método mais rentável para os carregamentos dos AEB (Barchański *et al.*, 2022), (Wang *et al.*, 2022).

III.1. Mobilidade elétrica de transporte de passageiros no panorama mundial

No ano 2015, estima-se que existiam $\approx 173\ 000$ autocarros elétricos a nível mundial, dos quais $\approx 86,71\%$ estariam localizados na China (IEA, 2016). Em 2016, foram registados 105 000 autocarros elétricos na China e 1000 na Europa. Em 2019, a Europa duplicou o número de registos. Em 2022 foram vendidos cerca de 66 000 autocarros elétricos a nível mundial, com uma representatividade de 4,5% do total de vendas de autocarros e com mais de 800 000 autocarros elétricos em operação (3% do total de autocarros a nível mundial) (IEA, 2023).

Denota-se uma predominância nos registos da China, à semelhança dos restantes anos, com 54 000 veículos (uma representatividade de $\approx 83,08\%$). É ainda evidente um aumento no número de registos na Europa. Das vendas registadas na Europa, a grande maioria dos veículos vendidos são de marcas chinesas e as baterias de marcas asiáticas (IEA, 2023). Observando-se a tendência na figura 6, é evidente o decréscimo do número de registos da China.

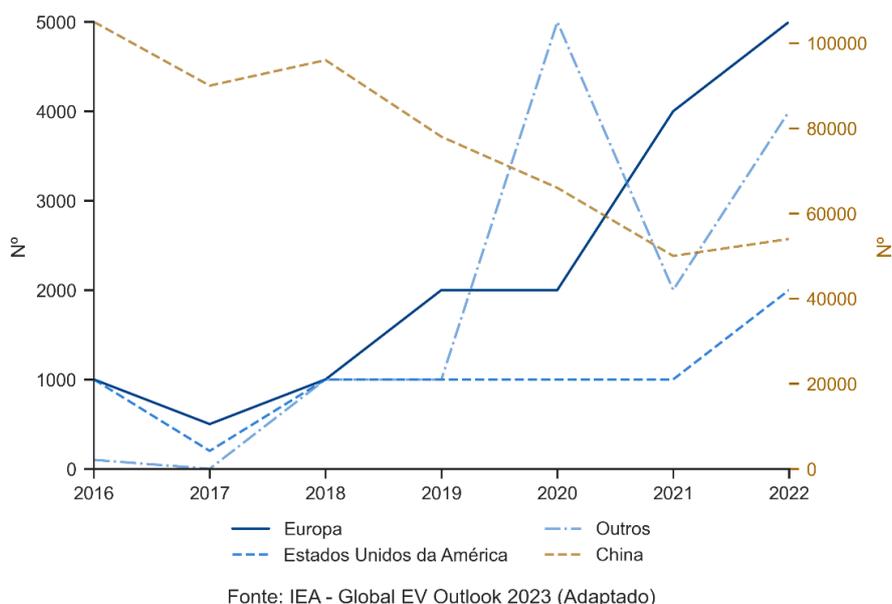


Figura 6 – Registos de autocarros eléctricos em todo mundo, 2015-2022

A razão deste decréscimo deve-se à variação em função de subsídios disponibilizados pelo governo central chinês (IEA, 2023). Com a redução progressiva dos subsídios a partir de 2018, as vendas de autocarros eléctricos começaram a aumentar em 2021, um sinal de que a indústria alcançou métricas de custo e desempenho que as tornam competitivas, sem apoio governamental (IEA, 2023). A China tem também uma das maiores quotas de autocarros eléctricos, atingindo quase 15% em 2022 e totalizando mais de 750 000 (mais de 95% do stock global) (IEA, 2023).

No caso da Europa, foram registados 5 000 veículos ($\approx 7,69\%$ do total), com quotas de vendas elevadas na Finlândia, na Noruega, Países Baixos, Dinamarca, Suécia e Suíça (IEA, 2023). A Irlanda introduziu uma meta para obter 300 autocarros eléctricos até 2025. Alguns países europeus também oferecem incentivos financeiros para autocarros eléctricos sob a forma de isenções fiscais, subsídios à aquisição e financiamento para apoio das infraestruturas de carregamento (IEA, 2023). No caso dos Estados Unidos, também são concedidos financiamentos para a compra, ou aluguer, de autocarros eléctricos, chegando a cobrir 85% do preço dos veículos e até 90% do custo das infraestruturas.

III.2. Mobilidade elétrica de transporte de passageiros em Portugal

O número de veículos elétricos matriculados, pesados de passageiros - Elétricos a baterias, observado na figura 7, permite perceber a tendência da implementação dos AEB, na ausência de informação mais detalhada.

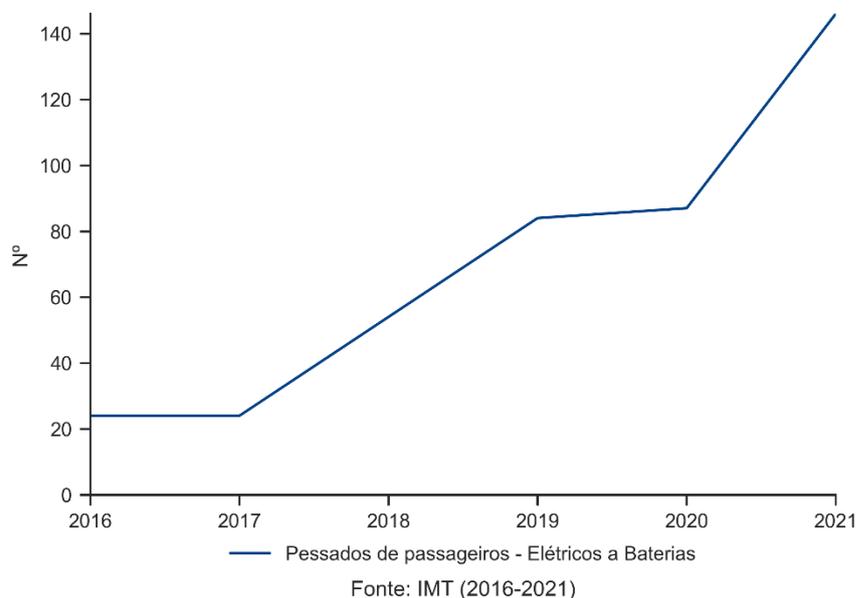


Figura 7 – Número de veículos elétricos matriculados (valores acumulados) em Portugal, 2016-2021

A partir dos Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes do Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT), de 2016 a 2021, identificou-se que do ano de 2016 a 2017 (IMT, 2018a) (IMT, 2018b) não houve qualquer variação do número acumulado de veículos matriculados, com valores de 24 matrículas. A 2018 (IMT, 2019), o número de veículos matriculados aumentou para 54 (aumento de 125% em relação ano anterior). Em 2019 (IMT, 2020), registou-se um aumento para 84 veículos ($\approx 55,56\%$) e em 2020 (IMT, 2021) deu-se um aumento para 87 ($\approx 3,57\%$). Em 2021 (IMT, 2023), o número acumulado de veículos matriculados atingiu os 146 veículos ($\approx 66,82\%$). Verificou-se assim um crescimento gradual da aquisição de veículos de transporte de passageiros elétricos a bateria. Esta tendência tem-se verificado em todos os veículos elétricos, registando-se, em 2021, um aumento de 54,9% em relação ao ano anterior (IMT, 2023).

Para melhor analisar a situação atual da operação de autocarros elétricos em Portugal, conduziram-se entrevistas presenciais a três operadoras de autocarros elétricos a bateria e uma pesquisa intensiva sobre a informação acessível online. Na ausência desta informação procurou-se ainda a recolha da mesma por via telefónica e e-mail. Que se tenha conhecimento, nunca ainda foi feito um levantamento desta

natureza em Portugal. Nas reuniões realizadas com as três operadoras obtiveram-se informações fulcrais sobre a operação desta tipologia de veículos.

Deixa-se a salvaguarda que as autonomias referidas são diferentes dos valores atribuídos pelos fabricantes, variando a autonomia e consumos com base nos fatores de influência dos consumos (ver capítulo II.2). Os valores indicados são referenciais dos operadores face à realidade e às características onde operam. Por recomendação dos fabricantes, tendo em vista a aumentar a fiabilidade e longevidade das baterias, as operadoras são aconselhadas a que os veículos retomem aos parques de recolha com SoC de 20%. Alerta-se também que as capacidades do número passageiros varia de operadora para operadora, tendo como base as normas de segurança e o a própria tara dos veículos.

III.2.1. O caso de Guimarães – Guimabus

Na reunião realizada em Serzedelo, Guimarães, com o Diretor Geral do Grupo Vale do Ave (S. Ferreira, comunicação pessoal, 12 de junho, 2023), recolheu-se informações sobre as características da frota e o *know how* da operação de autocarros elétricos. À data da recolha, a operadora detinha 27 autocarros elétricos a bateria, abrangendo 33,75% do total da frota eletrificada, de uma frota de 80 veículos. A 1 de janeiro de 2022, o Grupo Vale do Ave, concessionária da Guimabus, iniciou a operação de 15 autocarros *standard* e 5 autocarros *mini*. A dezembro do mesmo ano, adquiriu mais 6 autocarros *standard* e em fevereiro de 2023 entrou em operação a sua única unidade *midi*. Esta eletrificação deveu-se a uma obrigação contratual, assente na promoção da mobilidade sustentável, em que 50% dos transportes públicos vimaranenses deverão ser nulos em emissões até ao termo da concessão de 10 anos. A implementação destes veículos baseou-se em critérios de obrigatoriedade para operação nas áreas urbana e histórica da cidade, apesar da presença conjunta de autocarros a diesel nessas zonas. Na zona não urbana, a escolha fundamentou-se na adaptação da capacidade conforme o número de passageiros.

A frota é composta por 21 autocarros *standard* Irizar ie bus de 12 metros de comprimento, capacidade de 68 passageiros, com autonomias de 300 km/430 kWh e consumos de 1,1 a 1,3 kWh/km. Estes veículos operam entre 12 e 14 horas sem qualquer carregamento diário. 1 autocarro *midi* ISUZU NOVOciti VOLT de 8 metros de comprimento, capacidade de 52 passageiros e uma autonomia de 250 km/270 kWh. Ambos os veículos estão presentes na figura 8.



Figura 8 – Autocarros *mini* e *standard*, respetivamente, da Guimabus, 2023

Detém também 5 autocarros *mini* KARSAN e-JEST+ (Figura 9) de 6 metros de comprimento, capacidade para 22 passageiros e autonomia de 110 km/88 kWh, que realizam carregamentos de oportunidade, a meio do dia, entre 40 minutos e 1 hora em carregador *fast charge*. Os carregamentos dos AEB *standard* e *mini* são realizados entre as 00h e as 06h por existir maior disponibilidade energética na rede e a energia ser mais barata. O Diretor Geral do Grupo Vale do Ave refere que os carregamentos de oportunidade dos outros tipos de veículos não são uma escolha, considerando que não faz sentido em meio urbano devido à perda de eficiência da própria bateria e as características da própria operação.

Os carregamentos são suportados por 24 carregadores de 1 módulo de 150 kW singular *Fast Charge*, 3 carregadores de 22 kW, utilizados para os *mini* e situados na central de camionagem do GuimarãesShopping, e 10 módulos de 75 kW duplos *smart charge*, no parque de recolhas de Serzedelo, a cerca de 11 km do centro da cidade. A localização do parque de recolhas é apontada como uma desvantagem na operação, percorrendo, em alguns casos, ≈ 30 km em vazio. Face a este problema, defende que as entidades públicas deverão criar parques e infraestruturas de carregamento, independentemente da operadora e concessão, mantendo a validade dos equipamentos independentemente de alterações e cessações contratuais. Refere também que caso um dia a concessão termine, toda a infraestrutura não pode ser utilizada por qualquer outra operadora, por tratar-se de um grupo privado.



Figura 9 – Carregamento de autocarro mini na central de camionagem

Relativamente à potência da rede elétrica, o Diretor Geral do Grupo Vale do Ave revela que na zona não existem restrições de utilização, mas que é um problema muito comum na implementação e operação dos AEB. Quanto à taxa de avaria, revela que não é superior aos diesel e que as baterias têm um potencial de reutilização, no futuro, como armazenador de energia para a rede elétrica, pela degradação das baterias ser muito menor do que o expectável. Questionado sobre os fatores de esforço e de aumento potencial de consumo, refere que face às características dos veículos não têm sido notados grandes impactos, mas que a médio longo prazo a autonomia vai reduzindo com o envelhecimento. Planeia a realocação dos veículos a outras chapas de menores distâncias à medida que a autonomia decrescer. Identifica que o fator mais influenciador que denota no impacto da autonomia é o número de passageiros.

O início da operação da frota elétrica necessitou da instalação de um Posto de Transformação (PT), três postes de média tensão, a compra da frota, formação específica aos motoristas, construção da rede de distribuição entre carregadores, licenciamento, oficinas e aquisição dos postos de carregamento. Traduziu-se num investimento total de cerca de 12 a 13 milhões de euros, apresentando uma infraestrutura pronta para a operação da frota atual, com uma previsão e suporte para aumentos no futuro. Toda a criação das condições para a operação teve um período de preparação de um ano e meio, que na opinião do Diretor Geral foi bastante curto.

Questionado sobre o futuro, refere que o objetivo é continuar a eletrificação da frota e que apenas vê a alternativa elétrica no caso de Guimarães, mas que tudo depende dos avanços tecnológicos. Relativamente à implementação de autocarros a

hidrogénio, revelou que o investimento das infraestruturas e a própria tecnologia são ainda muito dispendiosas e prematuros.

Comparando a operação da Carris com a da Guimabus, o Diretor Geral do Grupo Vale do Ave. refere que ambas são muito semelhantes e que facilmente a transição dos autocarros da Carris pode ser possível, devendo adaptar os equipamentos às necessidades e que atualmente, autonomias de 400 a 500 kWh é o ideal para operações urbanas.

Do ponto de vista da adoção por parte da população, o Diretor Geral considera que foi uma mais-valia, devido à redução da poluição sonora, das emissões, da própria idade da frota e do ar quente oriundo do sistema de refrigeração do motor.

Quanto à adoção por parte dos motoristas, revela que na grande maioria preferem ainda os autocarros a diesel. Questionado, refere que as razões da preferência prendem-se com questões como maior precessão de velocidade e força dos veículos. Em conversa com um motorista da Guimabus, (H. Nogueira, comunicação pessoal, 12 de junho, 2023), motorista de autocarros elétricos e a combustível *standard* há um ano e meio, refere que prefere a condução dos elétricos devido à praticidade na sua operação. Vê como vantagens ser uma alternativa limpa, sem a presença de fumo e preocupações relativas à monitorização do óleo, uma melhor e maior aceleração. Por outro lado, refere que o ar condicionado é mais fraco em comparação com os autocarros a combustível e que os sistemas de segurança são mais complexos.

III.2.2. O caso de Lisboa – Companhia Carris de Ferro de Lisboa

De forma a proceder à recolha de informação relativa à operação, *know how*, dados e indicadores da área de estudo, contactou-se a Companhia Carris de Ferro de Lisboa. Desse contacto, resultaram duas reuniões, nomeadamente no dia 18 de novembro de 2022, com o Diretor do Gabinete de Estratégia e Inovação, e uma Eng.^a do mesmo departamento, e no dia 29 de maio de 2023, com um Eng.^o da Direção de Operações, o Chefe do Departamento de Informação e Controlo de Gestão da Operação, e a Eng.^a do Gabinete de Estratégia e Inovação .

A Carris iniciou a operação de autocarros elétricos em março de 2020 com a substituição total da linha 706 (Santa Apolónia ao Cais do Sodré, e vice-versa) (J. Vieira, comunicação pessoal, 2022, 18 de novembro). Foram adquiridos um total de 15 veículos, uma proporção de $\approx 2,05\%$ da frota de 732 autocarro, suportados por 16 postos de carregamento, situados na Estação de Recolha da Pontinha. Os 16 carregadores da Siemens apresentam uma potência de 50 kW, proporcionando carregamentos médios

de 5 horas. Com esta implementação, a Carris previu que cada quilómetro percorrido evite a emissão de 1,5kg de CO₂ (Carris, 2020). Os veículos atuais são do modelo *standard* CaetanoBus e.CityGold (presente na figura 10) têm 12 metros de comprimento, capacidade para 71 passageiros (34 lugares sentados, 36 de pé e 1 de mobilidade reduzida) e autonomia de 170 km/280 kWh (até 300 km, dependendo do perfil de operação). O preço unitário do veículo é de ≈400 mil euros, segundo a Sra. Eng.^a (J. Cunha, comunicação pessoal, 2022, 18 de novembro).



Figura 10 – Autocarro standard CaetanoBus e.CityGold da carreira 706 da Carris, 2022
Fonte: Francisco Malveiro Lino

A próxima aquisição de AEB estava prevista para setembro de 2023, com 30 novos veículos com nova versão de baterias elétricas, com maiores autonomias, entre 317 e 396 kWh, que permitirá à operadora realizar maiores frequências (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023). De modo a suportar a nova implementação, serão instalados 16 novos postos de carregamento duplos (J. Vieira., comunicação pessoal, 29 de maio, 2023), da Siemens, na estação de Miraflores (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023), totalizando 47 postos nos dois depósitos. Esta nova aquisição de frota representou um investimento de 12,7 milhões de euros (Silva, 2023). Com este investimento, as próximas linhas a serem eletrificadas, segundo Sra. Eng.^a (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023), são a 709, 711, 718 e o 758. Segundo o Sr. Eng.^o (J. Vieira, comunicação pessoal, 18 de novembro, 2022), os autocarros elétricos serão preferencialmente implementados nas ZER.

Em agosto de 2021, a Carris criou um projeto-piloto com 3 autocarros elétricos *mini*, modelo KARSAN Jest Electric para testes de desempenhos em operação nas carreiras 22B (Cais Sodré / circulação Príncipe Real), 734 (Martim Moniz - Estação Sta. Apolónia) e 28E (Martim Moniz - Prazeres) (Carris, 2021). No ano de 2022, foi aprovada a candidatura ao Plano de Recuperação e Resiliência para o apoio à obtenção de fundos na aquisição de autocarros elétricos (Carris, 2023). No âmbito do projeto europeu eULTIMATE, também em 2022, foi criado um modelo de simulação de operações com autocarros elétricos, desenvolvido numa parceria entre a Carris, Instituto Superior Técnico e AlmaDesign (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023). Atualmente, na carreira 767 (Campo Mártires Pátria - Reboleira (Metro)) tem-se realizado testes de desempenho, monitorização de performance e consumo em operação (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023). No Plano de Atividades e Orçamento – 2023 (Carris, 2022) é também referido que a operadora prevê adquirir 14 autocarros elétricos *mini* para zonas de malha urbana mais antiga. Evidencia-se assim um compromisso, por parte da operadora, para com a mobilidade sustentável e transição das frotas existentes para frotas elétricas. O Sr. Eng.º (N. Fonseca comunicação pessoal, 29 de maio, 2023) referiu que existe um processo de aquisição e instalação de painéis fotovoltaicos nos edifícios e coberturas dos estacionamento das estações de recolha. Questionado pela possível implementação de painéis fotovoltaicos nos veículos elétricos, afirma que o preço dos kits aumentaria o valor total de aquisição do veículo para ≈500 mil euros.

Relativamente à experiência na operação, afirmaram que a declividade potencia a recuperação da autonomia, beneficiando mais do que prejudica os consumos. A operadora refere que o consumo médio acumulado dos autocarros elétricos, para 2022, foi de 118 kWh/100 km. Na opinião do Sr. Eng.º (N. Fonseca, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023), as velocidades comerciais e de exploração, na sua generalidade, são muito baixas, muito explicado pelas características dos percursos e da densidade de tráfego. Na perspetiva da operadora, no cenário de Lisboa, é impensável transitar toda a frota e operação para autocarros elétricos a bateria, muito pelas limitações de disponibilidade de energia elétrica e pelas constantes interrupções na circulação. Preveem que a operação terá de ser realizada em sinergia entre autocarros a gás natural, hidrogénio e elétricos a bateria. A operadora refere que já existem constrangimentos ao nível da potência que os postos de transformação disponibilizam, existindo restrições, por parte do distribuidor de energia elétrica, ao nível da alimentação dos postos de transformação (J. Cunha, comunicação pessoal, 18 de novembro, 2022). Contudo, a intenção de implementação de AEB tem continuado.

III.2.3. O caso de Braga – Transportes Urbanos de Braga

Os TUB – Transportes Urbanos de Braga são uma empresa pública municipal, detida pela Câmara Municipal de Braga (Câmara Municipal de Braga, n.d.). Por recomendação do Diretor Geral do Grupo Vale do Ave, foi indicado que se contactasse a empresa dos TUB. Referiu que esta é das operadoras com mais *know how*, indicadores e métricas relativas aos AEB em Portugal (S. Ferreira, comunicação pessoal, 12 de junho, 2023).

A operação dos TUB regista dois milhões de quilómetros percorridos, destacando-se como a operadora de AEB com mais quilómetros percorridos em Portugal, segundo o Diretor do Departamento de Engenharia e Manutenção (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023). Na reunião realizada no Parque de Recolha dos TUB, em Braga, refere que a empresa detém uma proporção de $\approx 13,29\%$ da frota eletrificada, com 19 autocarros elétricos a bateria, num total de 143 veículos divididos entre diesel e gás natural. Na referida reunião, estiveram também presentes um Eng.º responsável pela estimação e monitorização de consumos, também do Departamento de Engenharia e Manutenção, e um Me. em SIG, do Departamento de Exploração de Transporte Público.

A operação de AEB iniciou-se no ano de 2018 com 6 veículos *standard*. Esta implementação coincidiu com o aumento do investimento por parte da autarquia na renovação da frota, com o objetivo de cumprir com as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Adicionalmente, pretende também responder à missão da empresa, baseada na mobilidade sustentável e descarbonização total da frota a 2030 (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023).

No final de 2018, como previamente referido, adquiriram 6 autocarros *standard* CaetanoBus e.CityGold de 12 metros de comprimento, capacidade de 81 lugares (40 sentados, 40 de pé e 1 de mobilidade reduzida) e autonomia de 150kWh, presente na figura 11. Estas unidades contêm 21 baterias de 7 kWh da *Forsee Power*. Em 2020, os TUB adquiriram mais 7 unidades *standard* CaetanoBus e.CityGold com as mesmas características que as unidades anteriores, sendo a única diferença conterem 9 baterias de 35 kWh e autonomia de 315 kWh. Na aquisição mais recente, em 2023, adquiriram mais 6 autocarros *standard* CaetanoBus e.CityGold com capacidade de 74 passageiros (41 sentados, 32 de pé e 1 de mobilidade reduzida) e 10 baterias de 42 kWh com autonomia de 420 kWh. Para além das capacidades de passageiros, autonomia e número de baterias, todas as características dos veículos da TUB são idênticas às características dos veículos operados pela Companhia Carris de Ferro de Lisboa,

nomeadamente os motores e as carroçarias (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023).



Figura 11 – Autocarro *standard* CaetanoBus e.CityGold. adquirido em 2018, TUB - 2023

Quanto às infraestruturas de carregamento, a empresa detém um total de 13 carregadores de um módulo, da marca *Magnum Cap*. Destes 13, dois carregadores têm potência de 150 kW, cinco com potência de 40 kW e seis de 90 kW. Toda esta infraestrutura está instalada no Parque de Recolha dos TUB e é suportada por um PT, também localizado no parque. Uma das preocupações principais na aquisição dos carregadores foi o potencial ruído provocado no carregamento, uma vez que este pode impactar os residentes próximos, e, portanto, foi uma das especificações pedidas no concurso público, (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023). No mais recente concurso público para as novas unidades de AEB, foi criado um concurso paralelo para adquirir 16 carregadores duplos de 150 kW da *Power Eletronics* (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023).

No final de 2023, previam iniciar a operação de mais 24 AEB, que à data da reunião já estavam a ser produzidos. Destas 24 unidades, 12 veículos são da empresa CaetanoBus e 12 da empresa chinesa Zhongtong Bus. As novas viaturas vão ser inseridas nas zonas rurais mais densas, ainda que, os AEB são mais suscetíveis à degradação da carroçaria causada pela trepidação das estradas (C. Marques, comunicação pessoal, 27 de junho, 2023).

O critério de implementação dos AEB na cidade de Braga baseou-se na alocação a locais da área urbana com mais passageiros e maior frequência, i.e., as linhas com

maior procura, procurando reduzir as emissões e o ruído nessas zonas. No processo de descarbonização da frota, de 2018 a 2022, registou-se um investimento total de 15,7 milhões de euros. No mesmo período, foram evitadas 2 836 toneladas (Ton CO₂ eq) de GEE e uma poupança financeira no total de 1 459 842 de euros (TUB, 2023)

À semelhança das operadoras anteriores, os TUB também têm em consideração, no planeamento dos carregamentos, a *gap* de 20% de autonomia restante. Questionados sobre a experiência na operação, referem que o ar condicionado e o aquecimento, apenas ligado em temperaturas ≤ 12 °C, podem influenciar os consumos entre 40 e 50%. Referem também que os fatores que mais influenciam o consumo são os declives, a temperatura, o fator humano, i.e., o estilo de condução, e a lotação de passageiros.

No início da operação, identificaram que os principais problemas associaram-se à compatibilidade entre os AEB e os carregadores, bem como a capacidade das infraestruturas. À semelhança da Guimabus, os TUB não têm qualquer restrição de distribuição da rede de energia elétrica, mas referem que se tornará um problema futuro nas áreas urbanas.

Questionados relativamente à opinião dos motoristas, identificaram que existiram queixas relativamente à direção dos veículos, que é ligeiramente mais dura em velocidades lentas e em manobras. Para a operação dos veículos, existiu formação específica para os motoristas, que é atualizada à medida que existe nova informação. Relativamente à população, referem que beneficia de veículos mais novos, com ar condicionado, menos vibrações e ruído.

No futuro, à semelhança da Carris, os TUB apontam mais para operações em sinergia do que na eletrificação total. Preveem que até 2030 entre 80 a 90 veículos da frota sejam de energia 100% limpa, como os autocarros elétricos a bateria e autocarros elétricos movidos a hidrogénio, ou autocarros de gás natural. Estes últimos já foram adquiridos e já estão a operar, contando com 25 veículos, e prevê-se ainda que as unidades de AEB, adquiridas em 2018, venham a ser adaptadas para autocarros elétricos movidos a hidrogénio. Questionados sobre a implementação de painéis solares, indicam que a rentabilidade da instalação é muito pouca, pois a área de cobertura do tejadilho dos veículos é muito pequena, para além de aumentar substancialmente o peso do veículo. Para além disso, o retorno do investimento seria a muito longo prazo. De momento, estão também a iniciar o planeamento de uma *Bus Rapid Transit*, neutro em emissões, permitindo aumentar a oferta de transporte público e responder às metas estabelecidas pela operadora e no Acordo de Paris.

III.2.4. Outras áreas urbanas de Portugal

Para complementar o levantamento realizado sobre as três operadoras já mencionadas, procedeu-se a um levantamento cronológico relativo aos principais centros urbanos de Portugal. Com o objetivo de sintetizar o processo de implementação dos autocarros elétricos, a informação adquirida apresenta um referencial temporal até ao dia 30 de junho de 2023. Deixa-se a salvaguarda de que poderão existir outros meios urbanos com autocarros elétricos, mas que não tenham sido possível obter informação durante este trabalho.

Em 2003, pela primeira vez em Portugal, são implementados, numa linha de transportes públicos de passageiros, dois miniautocarros elétricos da marca Gulliver, em Coimbra (SMTUC, n.d.). No final do ano de 2022, os Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra (SMTUC), operavam 29 autocarros elétricos (SMTUCa, 2023). Para o ano de 2023, a operadora planeou a aquisição de 22 novos autocarros elétricos com fundos do POSEUR (SMTUCb, 2023).

Na cidade do Porto, a Sociedade de Transportes Colectivos do Porto (STCP) iniciou os testes de implementação em fevereiro de 2017, com uma duração de 30 dias. Em abril de 2018, iniciou-se a operação de 2 autocarros elétricos (A. Ferreira, comunicação pessoal, 25 de julho, 2023). No mês de dezembro do mesmo ano, passaram a operar um total 12 veículos, aos quais, no mesmo mês de 2019, se juntaram mais 3 perfazendo 15 veículos. A novembro de 2021, a operadora adquiriu mais 5 veículos totalizando 20 autocarros, número que se manteve à data a recolha da informação (A. Ferreira, comunicação pessoal, 25 de julho, 2023). Segundo o Relatório de Contas de 2022, a STCP detém 5% da frota eletrificada (STCP, 2023), com uma previsão de 68 veículos em 2023 e 191 a 2027 (STCP, 2022).

Na cidade do Funchal, a operadora Horários do Funchal conta, desde 2019, com 5 autocarros elétricos (HF, 2022). No início de 2024, está planeada a implementação de 20 novos veículos (RTP Madeira, 2023, 05 de junho).

Na cidade de Aveiro, a AveiroBus, marca da Transdev, opera desde dezembro de 2018 três autocarros elétricos da CAETANO e.City Gold (Câmara Municipal de Aveiro, 2018, 14 de dezembro), presente na figura 12. A março de 2022, a operadora alocou mais um veículo à sua frota, prevendo ter um total de 14 autocarros até ao final de 2023 (B. Pelarigo, comunicação pessoal, 05 de julho, 2023).



Figura 12 – Autocarro *standard* CaetanoBus e.CityGold da Aveirobus, 2023

No ano de 2019, os STUB - Serviço de Transportes Urbanos de Bragança, empresa camarária, iniciou a operação de dois autocarros elétricos na cidade (Câmara Municipal de Bragança, 2020). Detêm $\approx 15,38\%$ da sua frota eletrificada.

Os Transportes Urbanos de Leiria (MOBILIS), em maio de 2023, obtiveram dois autocarros elétricos para a cidade de Leiria que substituíram 13 viaturas a diesel, com um investimento de um milhão de euros (Câmara Municipal de Leiria, 2023, 05 de maio).

Desde setembro de 2005, a Câmara Municipal de Viana do Castelo detém e opera dois miniautocarros elétricos, que circulam nas principais artérias da cidade (Rádio Alto Minho, 2020, 14 de janeiro).

Em fevereiro de 2022, a cidade Vila Real, a partir da concessão Urbanos Vila Real, implementou 2 autocarros elétricos a bateria na área urbana (Urbanos Vila Real, comunicação pessoal, 04 de julho, 2023).

No quadro 3, observa-se o resumo do número de autocarros elétricos em Portugal, por cada centro urbano considerado.

Quadro 3 – Número de autocarros elétricos, por cidade, em Portugal, à data de 30 de junho de 2023

Cidade	Nº de autocarros elétricos
Coimbra	29
Guimarães	27
Porto	20
Braga	19
Lisboa	15
Funchal	5
Aveiro	4
Bragança	2
Leiria	2
Viana do Castelo	2
Vila Real	2

Fonte: SMTUC, Rádio Alto Minho, Transdev, Câmara Municipal de Aveiro, HF, STUB, Carris, TUB, Guimabus, STCP, Câmara Municipal de Leiria

Para além da implementação dos autocarros elétricos em meio urbano, estes também já existem em viagens fora do circuito urbano (Nunes, 2022, junho). Em junho de 2022, a empresa FlixBus lançou o primeiro projeto-piloto, em Portugal, de um expresso elétrico. À semelhança da Alemanha e França, Portugal passou a ser um dos primeiros países com um serviço regular expresso de autocarros elétricos (Nunes, 2022, junho). Num percurso de mais de 200 km entre Porto-Bragança, a realização destas viagens de duas horas e 45 minutos obriga ao carregamento cada vez que chega ao destino.

Na cidade de Évora, a partir de 1 de julho de 2023, os Trevo - Transportes Rodoviários de Évora previam adquirir as primeiras unidades com um total de 23 autocarros elétricos num investimento de cerca de 6,7 milhões de euros, tornando-se a primeira cidade com uma frota integralmente elétrica em Portugal (Castro, F., 2023, junho).

IV. Caso de estudo: Aplicação do modelo de análise

Para a delimitação das áreas de operação descritas, o critério adotado baseou-se na localização espacial das paragens. Desse modo, selecionou-se as freguesias que continham paragens das respetivas operadoras.

Para o cálculo dos consumos, com o objetivo de avaliar a performance preditiva do modelo, recorreu-se à operação dos TUB, em Braga. Operam sobre as 37 freguesias do município de Braga, com um total de 11 749 indivíduos que usam o autocarro como principal meio de transporte, segundo dados dos Censos 2021. A operação totaliza-se em 74 linhas de autocarros, suportado por um total de 1 894 paragens e um total de $\approx 301,32$ km em operação.

Na figura 13, observa-se a área operacional dos TUB.

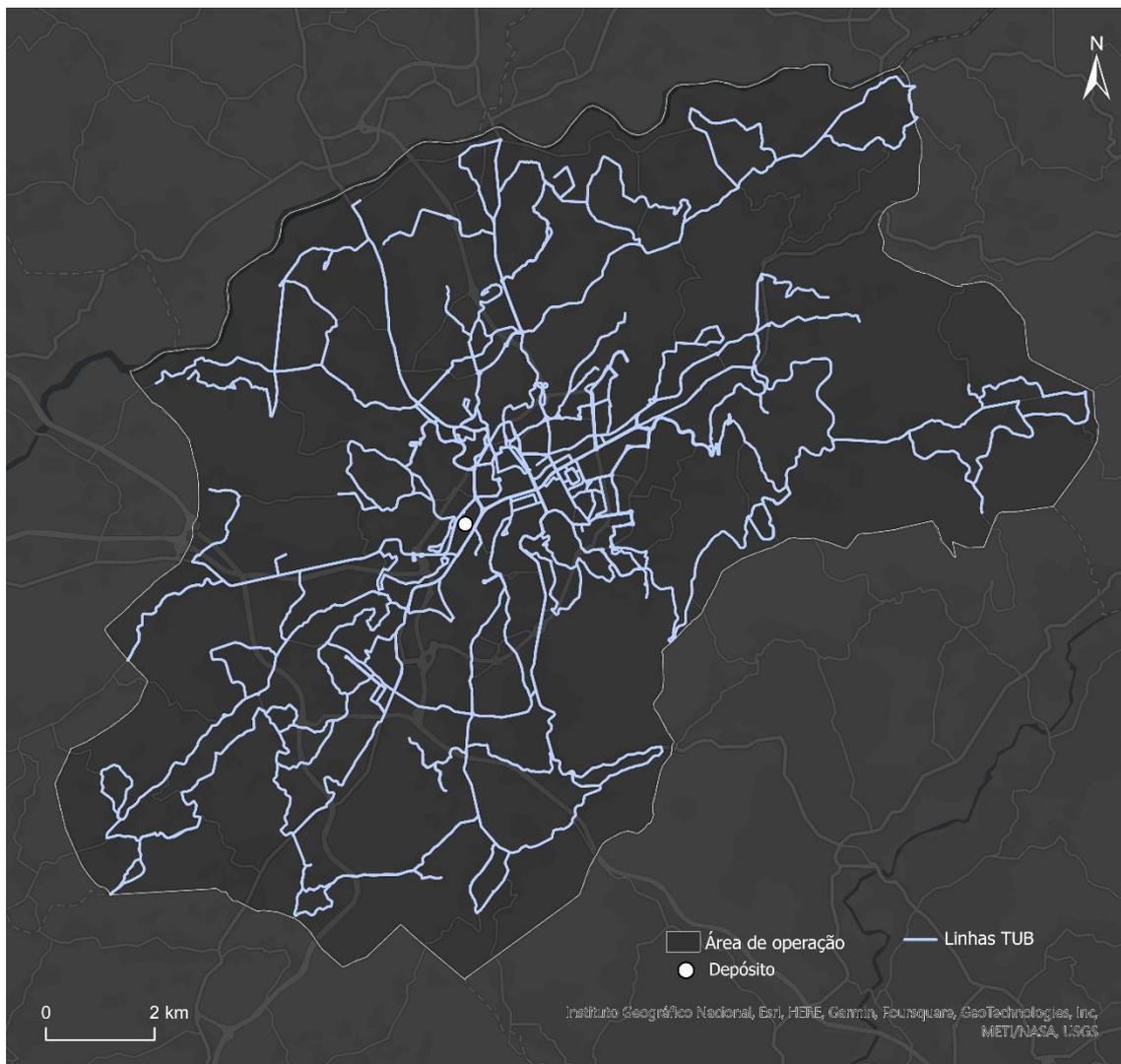


Figura 13 – Percursos de todas as linhas operadas pelos Transportes Urbanos de Braga, 2022

Para o cálculo dos consumos, com o intuito de estimar a transição das carreiras em Lisboa, recorreu-se à operação da Carris como área de estudo. Opera sobre o município de Almada, Lisboa, Oeiras, Amadora, Odivelas e Loures, numa extensão de $\approx 2\,878,68$ km de percursos um total de 37 freguesias, com 78 925, segundo dados dos Censos 2021, que têm como principal meio de transporte o autocarro. A área de estudo da Carris engloba um total de 109 linhas, divididas entre elétricos, elevadores, ascensores e autocarros, e um total de 2 316 paragens. Das 109 carreiras, 99 são linhas com autocarros em operação, divididos em tipologia Standard, articulados, mini e médio. Toda a operação é suportada pelas estações de recolha de Miraflores, Musgueira, Pontinha e Santo Amaro, sendo esta última exclusiva à operação de elétricos

Na figura 14, é representada a área operacional e as suas respetivas carreiras.

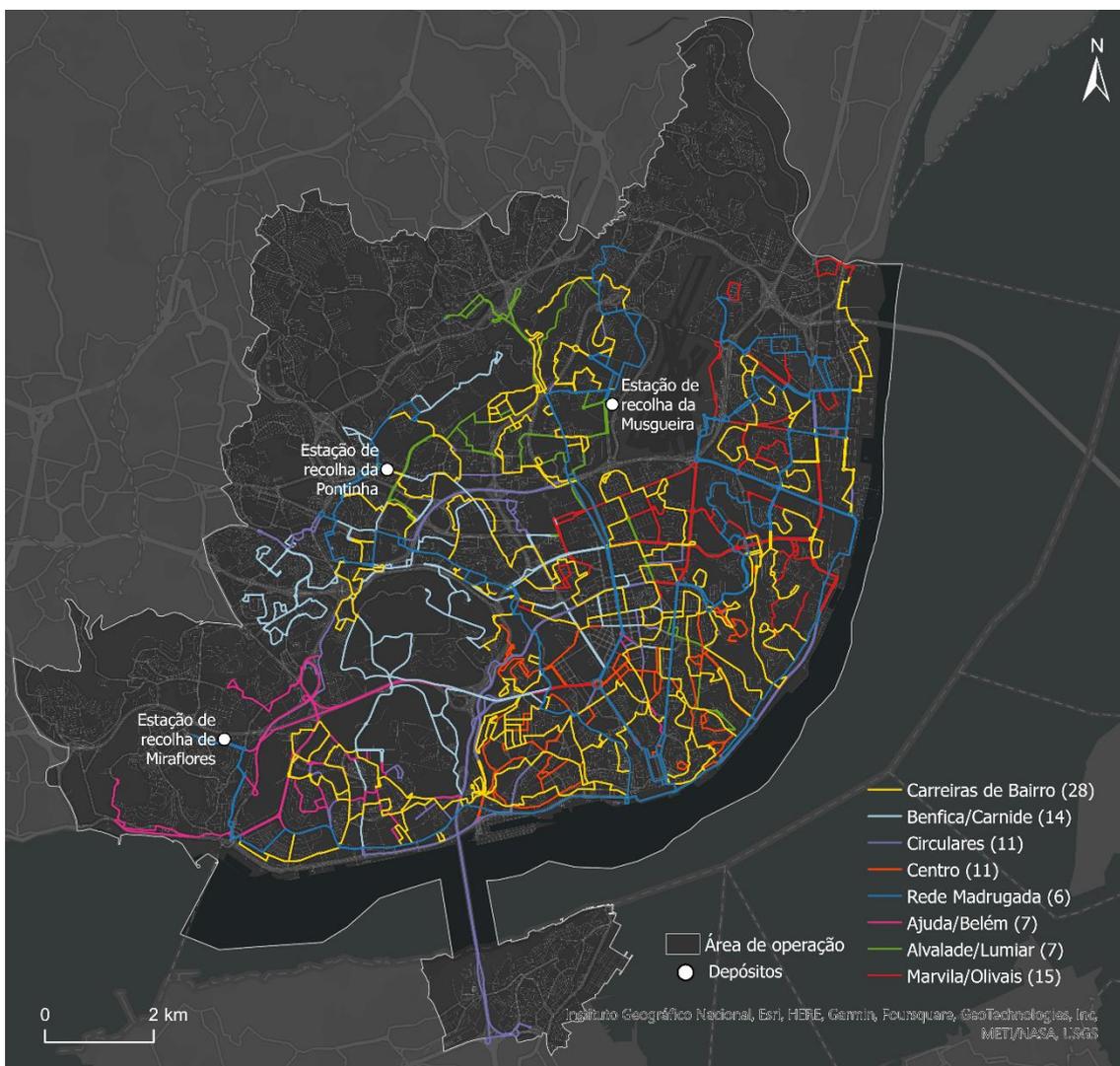


Figura 14 - Percursos de todas as linhas operadas pela Carris Ferro de Lisboa, 2022

A cobertura espacial da operação subdivide-se num zoneamento, representado por cores. A zona Noroeste da área de operação, representada pela cor azul, abrange principalmente as freguesias de Alfragide, Benfica, Carnide e União das freguesias de Pontinha e Famões. Na zona Ocidental, a cor-de-rosa, insere-se a estação de recolha de Miraflores, operando na sua grande maioria nas freguesias da Ajuda, União das freguesias de Algés, Linda-a-Velha e Cruz Quebrada-Dafundo, e Belém. Nessa zona operam também elétricos clássicos e articulados. Simbolizada pela cor laranja, a zona Centro opera maioritariamente sobre as ZER, com maior incidência nas freguesias de Santa Maria Maior, Misericórdia, São Vicente e Santo António. Nessa área, está inserida a carreira 706 e a maioria das linhas de elétricos clássicos, ascensores e elevadores.

Na parte Oriental, caracterizada a vermelho, contém a 18ª linha mais extensa da Carris, a 794 (Estação Oriente - Restauradores). A sua operação incide principalmente nas freguesias de Marvila, Parque das Nações, União das freguesias de Moscavide e Portela, e Olivais. A zona Norte, a verde, é das zonas que tem menos carreiras, contendo a 20ª mais curta em operação, a 796 (Campo Grande - Galinheiras). A sua área de atuação centra-se, maioritariamente, nas freguesias de Alvalade, Odivelas, Lumiar e Santa Clara. As Carreiras Circulares, a lilás, apresentam-se como as linhas com maior extensão de toda a operação da Carris. Estão mais dispersas por toda a área operacional, não se limitando a uma zona da área de operação. Incluída está a 728 (Restelo - Portela), a carreira mais extensa da totalidade das linhas existentes.

As Carreiras de Bairro apresentam também uma grande dispersão pela área de operação. Apresenta-se como a classe com mais carreiras e por efetuarem percursos mais curtos. As linhas associadas à Rede Madrugada apresentam um ponto de ligação entre a zona Centro e as restantes zonas referidas anteriormente. À semelhança das linhas Circulares, distingue-se pela sua dimensão dos percursos. Destaca-se a 208 (Cais Sodré - Estação Oriente) como a 4ª linha mais extensa em operação.

IV.1. Aquisição de dados

Uma das premissas fundamentais deste trabalho consistiu na elaboração de uma metodologia que possibilitasse a execução de um modelo sem depender de quaisquer dados de operação pré-existentes. Com o propósito de testar a viabilidade e fidelidade do modelo, em relação à realidade operacional, foram recolhidos dados operacionais junto das operadoras envolvidas no estudo de caso. Os metadados referentes à informação recolhida estão presentes no Anexo 1.

IV.1.1. Braga

Visando representar a temperatura como fator de consumo, recolheu-se a temperatura média do ar, oriunda do Instituto Nacional de Estatística (INE), para os meses de 2022, individualizando-se os dados provenientes da estação meteorológica de Braga/Merelim.

Na entrevista à operadora, o Departamento de Engenharia de Equipamentos e Manutenção e o Departamento de Exploração de Transporte Público, dos TUB, demonstraram-se disponíveis para a partilha de informação relativa à sua operação. Solicitou-se acesso aos consumos médios mensais e diários, por veículo e linha, ao longo do ano de 2022. Essa informação revelou-se crucial para identificar os dias de operação de cada veículo, os respetivos veículos que operam em cada carreira, e os consumos médios, em kWh/km, referentes ao mês de outubro de 2022. Adicionalmente, requereu-se acesso à plataforma de gestão de frotas elétricas da ChargePoint, a *dashboard* Viriciti. A plataforma regista todo o histórico de operação, recolhendo informação com periodicidade variável. Extraíu-se informações sobre velocidades, frequências e respetivos percursos de saída e recolha ao depósito, distância percorrida, energia utilizada em serviço e eficiência do serviço. Na ausência da disponibilização de velocidades de exploração, exportou-se as velocidades médias referentes ao mês de outubro de 2022, que representa de forma equivalente a velocidade de exploração. Realizou-se o mesmo procedimento para as frequências, permitindo a definição dos percursos reais que os veículos realizam de saída e recolha ao depósito. A distância percorrida, assim como a energia utilizada em serviço e a eficiência do serviço, permite a comparação e validação entre os *outputs* do modelo e a realidade.

De modo a integrar a informação extraída da Viriciti, requereu-se os percursos, espacializados dos TUB. Foi disponibilizado pela operadora um ficheiro KMZ com todos os percursos existentes. Simulando a altimetria da área de estudo, adquiriu-se um Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente do Copernicus Land Monitoring Service,

referente a abril de 2011. Para definir os limites da área de operação com base nas freguesias abrangentes, recorreu-se à mesma utilizou-se a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP), referente aos limites administrativos de 2022, vigente à data da recolha da informação.

IV.1.2. Lisboa

No âmbito da Carris, o Gabinete de Planeamento Estratégico e Inovação, juntamente com o Departamento de Informação e Controlo de Gestão da Operação, disponibilizaram integralmente os dados relativos à operação.

No que concerne à informação alfanumérica, foram obtidas as frequências, por viagem de cada carreira. Estes dados representam o número médio de viagens por carreira em diferentes momentos do dia, desempenhando um papel crucial na definição dos percursos de ida e recolha aos depósitos, assim como no estabelecimento do número de viagens, por carreira, no modelo. Esses dados abrangem todas as carreiras da Carris no ano de 2022, com desagregação por períodos de inverno, fora do período escolar, verão, agosto e madrugada. Para o modelo, utilizou-se apenas as frequências para os dias úteis de inverno, representando o número médio de viagens, por carreira, em diferentes momentos do dia. Para identificar as carreiras que operam veículos standard na frota da Carris, procedeu-se à aquisição de informações sobre a tipologia da frota por carreira. Esta informação descreve a tipologia de frota, dividida em autocarros standard, mini, médio e articulado, durante os dias úteis, sábados e domingos/feriados. A caracterização inclui tanto a tipologia padrão da frota como a tipologia alternativa da frota, esta última aplicada em situações em que o nível de procura o permita.

Foi de extrema importância adquirir informações sobre a origem-destino de cada carreira em relação ao seu respetivo depósito. Além do percurso em operação, é fundamental incluir os percursos de ida e recolha ao depósito nos consumos. Com esse propósito, foram solicitados dados relativos às carreiras e às suas correspondentes estações de recolha. Esta informação compreende a identificação da carreira e a estação associada à operação de recolha. Com o objetivo de simular o peso associado à presença, ou ausência, de passageiros, considerando as variações de peso decorrentes das entradas e saídas, obteve-se dez diagramas de carga por viagem média, abrangendo o período de 2021 a 2023. Esta informação compreende as entradas e saídas de passageiros, as cargas distintas por época do ano, mês, carreira e sentido da viagem.

Para modelar a velocidade em operação, recorreu-se à aquisição de velocidades médias, tendo-se acesso às velocidades de exploração e comercial por carreira da Carris. A partir dessa informação, referente ao ano de 2022, foram selecionados os valores de velocidade de exploração devido às suas especificações, nomeadamente a representação dos tempos de almofada, velocidades em percursos de recolha e saída do depósito. Para efeitos de comparação, a média de velocidade de exploração para os autocarros standard foi de 14,2 km/h e para a velocidade comercial de 17,7 km/h. Das informações referidas em supra, devido à confidencialidade e sensibilidade dos dados, não é possível divulgar essa informação.

Nos dados espaciais, a integração dos percursos e das respetivas paragens mostraram-se fundamentais para a representação da operação. Esta informação representou as distâncias percorridas por carreira, assim como permitiu a definição dos percursos, e respetivas distâncias entre paragens-depósito. Numa primeira abordagem, recolheram-se dados oriundos da plataforma Transporlis. A Transporlis é uma associação que explora e gere os serviços de informação de viagens multimodais da Área Metropolitana de Lisboa, tendo como principais objetivos promover a mobilidade sustentável, promover a utilização dos serviços de transporte público de passageiros e atualizar e desenvolver o sistema de informação de viagens multimodais para a AML (Transporlis, n.d.). Exportou-se dados em formato General Transit Feed Specification (GTFS) da Carris, referentes a 22 de novembro de 2022. Ao analisar-se a informação, denotou-se que a escala de detalhe do percurso de cada carreira não correspondia fielmente à realidade dos percursos e ao perfil da rede viária. Este problema revelou-se significativo por distorcer a representação da realidade e não refletir as distâncias das carreiras com precisão. Adicionalmente, no caso específico de Almada, observou-se que a travessia do rio Tejo estava vetorizada sobre a água e não sobre a ponte 25 de abril. Perante o enviesamento identificado nos dados, solicitou-se à Carris um novo conjunto de dados no formato GTFS, contendo as linhas com a geometria correta, as informações detalhadas sobre as linhas, paragens e os respetivos dados de operação. Essa nova informação, referente a maio de 2023, quando convertida para o formato *shapefile*, apresentou as características desejadas em relação à realidade dos percursos.

Dado que a temperatura ambiente, enquanto fator de consumo, influencia a eficiência energética, procedeu-se à recolha da temperatura média do ar (em °C) para todos os meses de 2022 a partir da base de dados do INE. No caso da área de operação da Carris, foram selecionados os dados referentes à estação meteorológica Lisboa/Gago Coutinho.

Como base para a modelação, abrangendo a circulação e operação dos veículos, assim como a definição dos percursos de saída e recolha dos depósitos, foi necessária a incorporação da rede viária da área de estudo. Nesse sentido, utilizou-se a rede viária da HERE, referente a 2017. Essa informação abrange as direções de circulação, as vias permitidas para circulação de autocarros e a caracterização das vias, incluindo acessos públicos ou privados. Considerando que as características do percurso, como o relevo ou declividade, também afetam os consumos, adquiriu-se um MDE para a área de estudo. Essa informação foi obtida do Copernicus Land Monitoring Service, com referência temporal a abril de 2011. Possui uma resolução de 25 m e uma precisão vertical de aproximadamente 7m de RMSE. Para delimitar e restringir a área de operação, utilizou-se a CAOP referente aos limites administrativos de 2022.

IV.2. Tratamento de dados

A todos os dados adquiridos, reprojeteu-se o seu sistema de coordenadas de origem. Transformou-se todos os dados espaciais para ETRS 1989 Portugal TM06 (EPSG:3763) para ambas as áreas de estudo. A escolha desse sistema baseou-se por ambas as áreas de estudo se localizarem em Portugal Continental.

No tratamento da rede viária realizou-se filtros aos campos existentes, pretendendo-se representar as vias permitidas à circulação de autocarros. No processo de recorte da rede viária aos limites área de estudo deixou-se uma faixa de 400 metros de intervalo de confiança, resultando 63 593 trechos. Esta faixa permitiu a integração de algumas vias fora da área de operação, onde os veículos circulam. Numa segunda abordagem, selecionou-se todas as vias onde é permitida a circulação de autocarros, excluindo-se um total de 8 517 segmentos. Eliminou-se todas as vias não pavimentadas, todas as vias privadas, e acessos a parques privados, excetuando as vias, e acessos, referentes aos depósitos da Carris. Neste processo, eliminaram-se 2 913 trechos. Por último, removeu-se todas as vias sem acesso público, excetuando também os depósitos, num total de 584 segmentos.

Após o processo de filtragem, procedeu-se à validação topológica da rede, eliminando potenciais erros e enviesamentos nos resultados. Para efeitos de validação da rede viária, utilizou-se as regras de *Must not intersect*, identificando as interseções entre trechos da rede, *Must be single part*, os trechos não estejam ligados entre si, *Must not have dangels*, segmentos têm de estar ligados entre si a partir dos seus respetivos vértices, e *Must not intersect or touch interior*, detetando interseções e contactos entre segmentos. Todos os erros foram analisados, individualmente, e

corrigidos quando necessário e marcados como exceções em situações que não necessitavam de intervenção.

Relativamente aos MDE, criou-se também uma faixa de 400 metros como intervalo de confiança. Para identificar e corrigir depressões resultantes de erros de deteção remota, procedeu-se a técnicas de validação de superfícies *raster*. Utilizou-se as funções de *Flow Direction* e *Sink*. Este procedimento foi aplicado para ambos os MDE, identificando-se 767 depressões em Lisboa e 385 em Braga. Todas as depressões identificadas foram analisadas, concluindo-se que todas se tratava de erros na recolha da informação. Procedeu-se à sua correção com a ferramenta *Fill*. Após o processo, correu-se novamente a validação de identificação onde não se verificou qualquer depressão nas superfícies.

Pretendendo-se detalhar o cálculo dos consumos, repartiu-se todos os vetores linha, relativos aos percursos de ambas as operadoras, em 250 metros. A escolha desta distância fundamentou-se na assunção de que, se os veículos circularem a uma velocidade média de 15km/h, levarão 60 segundos a percorrer o segmento, permitindo uma abordagem mais próxima para o cálculo dos consumos de minuto a minuto.

IV.3. Criação de informação

Na ausência de acesso a informação, ou na sua inexistência, procedeu-se à criação de informação. Como mencionado anteriormente, toda a informação foi vetorizada à escala 1:1 000, no sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06 (EPSG:3763).

Vetorizou-se os depósitos de recolha da CARIS, nomeadamente da Pontinha, Musgueira e Miraflores. O critério de localização do ponto baseou-se na entrada de cada depósito, definido pela informação da rede viária, realizado sobre o *Base Map World Imagery*, da Esri. O critério considerou a localização variável dos postos de carregamento dentro dos depósitos, tendo também em conta que existem depósitos sem qualquer posto de carregamento, nomeadamente na Musgueira e Miraflores. Utilizou-se os mesmos critérios no depósito dos TUB, à exceção da utilização da rede viária.

Outra variável essencial na modelação era a localização das paragens. Esta informação pretende representar o local de entrada e saída de passageiros, que influência os consumos, e representando as paragens iniciais e finais de cada carreira. No caso de Braga, não se teve acesso a essa informação, e procedeu-se à vetorização das paragens. Realizou-se este processo a partir da informação disponível na

plataforma Viriciti e com a informação de horários e respetivos percursos. A vetorização, à semelhança dos depósitos, foi feita sobre o base map World Imagery da Esri, tendo-se como critério o centroide de cada paragem.

Com a informação do depósito e das paragens dos TUB, procedeu-se à vetorização dos percursos de ida e recolha ao depósito. Com o acesso à plataforma Viriciti, e a ausência da rede viária para Braga, vetorizou-se os quatro percursos reais dos AEB. Teve-se em conta as frequências médias de operação neste processo. Utilizou-se também, como base de criação, o *Base Map* da Esri, após verificar-se que os percursos correspondiam às vias.

No caso de Lisboa, não existia informação espacial dos percursos aos depósitos nem acesso à plataforma Viriciti. Recorreu-se ao *Network Analyst*, com a função *Closest Facility*. Comparando o número de carreiras da Carris com as dos TUB, de 99 para 4, respetivamente, além de não se ter acesso aos percursos reais, justificou a utilização desta metodologia. Validou-se com a operadora a utilização das frequências médias para a seleção da paragem de retorno e a utilização do caminho mais próximo, que foi confirmada como muito próxima à realidade. Utilizou-se as frequências relativas ao período de inverno.

Neste processo, utilizou-se as paragens, os depósitos e a rede viária da área de estudo. Definiu-se as conectividades da rede com política de conectividade *endpoint*, restringindo situações de mudança de via na presença de túneis ou pontes. Com a ausência de um campo de elevação das vias, na informação base da rede viária, identificou-se como um problema de topologia da rede. No processo da modelação, identificou-se que o modelo estava a considerar qualquer interseção de linhas como uma interceção rodoviária. Face a esta questão, procedeu-se à criação de um campo e à respetiva caracterização da rede, trecho a trecho, permitindo a ligação fiel à realidade entre as vias.

Como custo, utilizou-se o fator de distância-tempo, e como restrições, as direções de circulação por via e inversões de sentido de marcha apenas em vias sem saída. Na definição dos percursos de recolha, utilizou-se a direção de *Toward Facilities*, simulando o regresso ao depósito, e nos percursos de saída o *Away from Facilities*.

IV.4. Proposta de modelo de cálculo

A fórmula de cálculo utilizada foi adaptada de um modelo criado e desenvolvido por Hjelkrem *et al* (2021), o qual também foi aplicada na criação de um modelo de simulação, no âmbito projeto europeu eULTIMATE, uma parceria entre a CARRIS, o Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa e a AlmaDesign (J. Cunha, comunicação pessoal, 29 de maio, 2023). Os valores descritos quanto às características do veículo são referentes ao modelo dos AEB utilizados por ambas as operadoras.

O consumo total de um AEB (C_{aeb}) é expresso em kWh,

$$C_{aeb} = C_t + C_{Paux} + C_{Vaux} \quad [1]$$

representado pela integração do consumo em tração (C_t), o consumo auxiliar em paragem (C_{Paux}) e o consumo auxiliar em viagem (C_{Vaux}).

C_{Vaux} é dado pela fórmula,

$$C_{Vaux} = \frac{\frac{E_{aux}}{h_{bateria}} t_{vs}}{h_s} \quad [2]$$

onde E_{aux} a energia utilizada pelos sistemas auxiliares, t_{vs} o tempo em viagem, em segundos, $h_{bateria}$ o coeficiente de eficiência da bateria (0.9 kW) e h_s . número de segundos numa hora. E_{aux} é expresso por,

$$E_{aux} = E_v + E_{out} \quad [3]$$

onde E_v a energia utilizada para a operação do sistema de ar condicionado e E_{out} a energia consumida nos outros equipamentos eletrónicos auxiliares. E_v é representado por $\approx 0,5$ kW e $E_{out} \approx 2$ kW.

C_{Paux} calculado por,

$$C_{Paux} = \frac{\frac{E_{aqx}}{h_{bateria}} t_p}{h_s} \quad [4]$$

onde t_p é o tempo, em segundos, despendido em paragem. Na modelação, utilizou-se dois parâmetros variáveis, com a definição de 60 segundos na primeira paragem, e 20 segundos nas restantes. Estes parâmetros basearam-se nos tempos utilizados no modelo de simulação oriundo do eULTIMATE. E_{aqx} é expresso por,

$$E_{aqx} = E_{aq} + E_{aux} \quad [5]$$

E_{aq} representa a energia despendida, em kW, no aquecimento ou arrefecimento do ar. É definido como,

$$E_{aq} = \rho \gamma_p \left(\frac{v_{bus}}{450} + \left(\frac{a_0}{6} \sqrt{g'A} + 0,0625 \right) A_{pa} \right) |DT| \quad [6]$$

onde ρ o coeficiente de densidade do ar (1,2 kg/m³), γ_p o coeficiente de capacidade térmica de aquecimento do ar (1,005kg), v_{bus} o volume do autocarro, em m³, a_0 a área de abertura das portas, em m², A a altura da abertura da porta, em metros, A_{pa} a presença, ou não, de uma paragem, DT a diferença de T_{ext} (temperatura exterior) e T_{int} (temperatura interior). O valor de v_{bus} é representado por 93,536 m³, a_0 por 2,72 m², A por 2m. Em A_{pa} existe variação booleana, pretendendo representar a presença de uma paragem e a respetiva abertura das portas. O valor de T_{int} , i.e., 22°C, foi retirado do modelo eULTIMATE e de Hjelkrem *et al* (2021). Em T_{ext} utilizou-se as temperaturas médias mensais adquiridas.

g' representa a aceleração efetiva da gravidade e expressa-se por,

$$g' = \frac{gDT}{T_{ext} + T_{int}} \quad [7]$$

onde g é a aceleração da gravidade ($\approx 9,807$ m/s²).

C_t é representado por,

$$C_t = \frac{\frac{E_{tr}}{h_{ebus}} t_{vs}}{k h_s} \quad [8]$$

onde E_{tr} a energia necessária para locomoção do veículo, h_{ebus} é o coeficiente de eficiência de conversão (expresso em 0,82 W), e k o conversor de W para kW (1000 W).

E_{tr} é resultante da velocidade (v), e condições propícias para a regeneração de energia são atendidas quando a velocidade é igual ou superior a 15 km/h. É dado por,

$$E_{tr} = \begin{cases} 0 & v < 15 \text{ km/h} \ \& \ E_t < 0, \\ E_t & v \geq 15 \text{ km/h} \end{cases} \quad [9]$$

E_t é definido como,

$$E_t = v \{ mg[\sin(\alpha) + \gamma_r \cos(\alpha)] + \frac{1}{2} \rho_d a_f \gamma_d + (m a_{ci}) \} \quad [10]$$

onde m a massa do veículo, α a inclinação do trecho, em radianos, γ_r o coeficiente de rolamento, ρ_d o coeficiente de densidade do ar, a_f a área frontal, em m^2 , do AEB, γ_d o coeficiente de atrito e a_{ci} a aceleração instantânea. m resultou da integração do peso do veículo com a capacidade de passageiros dos AEB por o peso médio de um passageiro i.e., 68 kg, incluindo também o peso médio do condutor e do guia (150kg) (República Portuguesa, 2017). Em vazios, utilizou-se o valor de 14 006 kg. a_f teve valor de 8,4 m^2 . a_{ci} é apenas considerado na utilização de velocidades em tempo real, sendo $a_{ci}=0$ em velocidades médias. α expressa-se em,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z_b - Z_a}{d} \right) \quad [11]$$

onde d é a distância do trecho, em metros, Z_x a altitude, em metros, no vértice do vetor do trecho.

V. Resultados

No seguimento do processo de modelação, utilizou-se os dados reais de operação dos TUB. Esta decisão baseou-se na necessidade de analisar a viabilidade do modelo na utilização de valores médios, na ausência dos valores reais em diferentes variáveis. Recorreu-se também a uma análise de sensibilidade com a variabilidade de diversos fatores de consumo.

V.1. Braga

Do total de percursos dos TUB, quatro estão totalmente eletrificados, que integram a totalidade dos 19 veículos elétricos. As linhas são divididas pelas linhas 96 (Hotel Lamações - E.Leclerc), 87 (Estação C.F. - Hospital), 74 (Camélias - Hospital) e 43 (Estação - Universidade do Minho), presentes na figura 15.

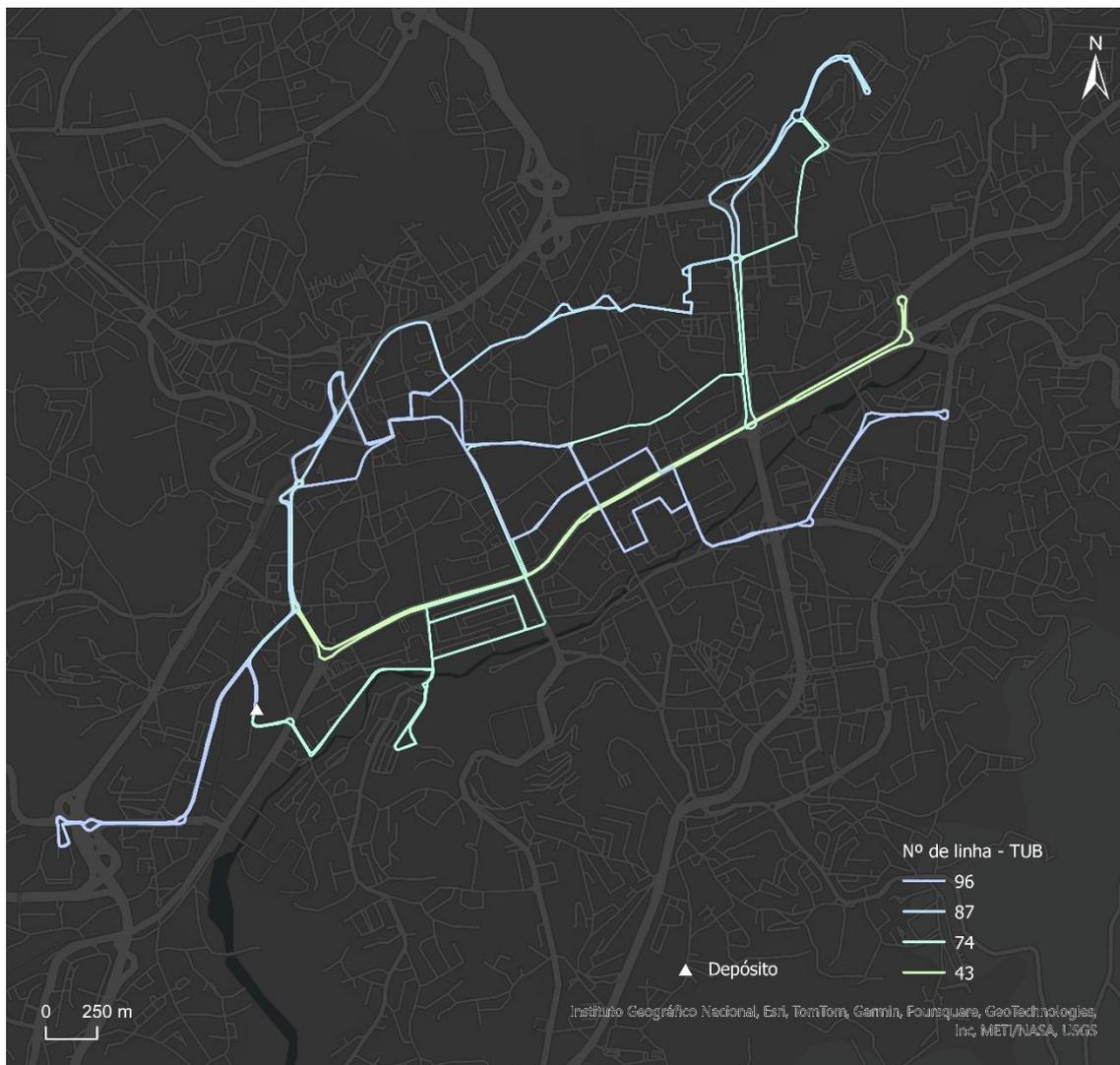


Figura 15 – Linhas operadas por autocarros elétricos a bateria dos Transportes Urbanos de Braga, 2022

No modelo de base, utilizou-se a velocidade média em serviço, referente ao mês de outubro, 75% da capacidade do veículo, utilizado em Hjelkrem *et al* (2021), no fator m em [10], e a temperatura média mensal T_{ext} , em [6] e [7], referente ao mesmo mês. No mês de outubro de 2022, a temperatura média do ar foi de 18 °C.

A velocidade média foi retirada da plataforma Viriciti, com um intervalo temporal de 01 a 31 de outubro. Recorreu-se à velocidade média em serviço, por não representar as velocidades referentes a condução, ou em circulação lenta, durante menos de dez minutos (Chargepoint, n.d.), excluindo percursos fora dos trajetos de operação e recolha/ida. Recolheram-se as velocidades para todos os veículos e calculou-se a média do total das amostras, como observa-se no quadro 4, utilizando como *input* do fator v .

Quadro 4 – Velocidades médias em serviço de todos os veículos elétricos dos TUB, 01-31 de outubro de 2022

Linha	Veículo	Velocidade média em serviço (km/h)
96	1001	11,370
96	1003	12,260
96	1005	11,540
96	1006	11,140
96	\bar{x}	11,578
74	1002	12,380
74	1004	-
74	1007	11,370
74	1013	-
74	\bar{x}	11,875
87	1008	11,650
87	1010	12,720
87	1011	12,580
87	\bar{x}	12,317
43	1009	15,810
43	1012	15,440
43	\bar{x}	15,625

Fonte: Viriciti – TUB

Com base na parametrização indicada, modelou-se um percurso de ida e recolha ao depósito, e um circuito em cada sentido da operação. Exportou-se da plataforma Viriciti os consumos reais referentes ao dia 03 de outubro de 2022. Obteve-se os resultados presentes no quadro 5.

Quadro 5 – Consumos estimados, referentes a outubro de 2022, e consumos reais a 03 de outubro de 2022 para todas as linhas eletrificadas dos TUB

	Linha 96			Linha 87		
	SIG	Real	Δ	SIG	Real	Δ
Distância (km)	19,152	19,100	0,052	12,754	12,900	-0,146
Consumo (kWh)	26,717	22,850	3,867	20,514	16,030	4,484
kWh/km	1,395	1,196	0,199	1,608	1,243	0,366

	Linha 74			Linha 43		
	SIG	Real	Δ	SIG	Real	Δ
Distância (km)	16,377	16,500	-0,123	11,289	11,900	-0,611
Consumo (kWh)	26,235	20,560	5,675	9,498	12,300	-2,802
kWh/km	1,602	1,246	0,356	0,841	1,034	-0,192

Analisando os resultados, é evidente a diferença entre os resultados do modelo e dos consumos reais. As diferenças na distância entre os dados e os resultados explica-se pela variabilidade do estilo de condução de condutor para condutor e a escala adotada na vetorização dos percursos. Considerou-se que estas variações, além de impactar a precisão no cálculo do consumo, são satisfatórias, sendo que os erros variam entre 0,272%, na linha 96, e -5,134%, na linha 43.

Nos consumos destaca-se uma sobrestimação em relação à realidade, à exceção da linha 43, que apresenta subestimação. A linha 96 demonstrou a menor dessemelhança, com 83,077% de precisão, da linha 87, com 72,027% e a linha 74 com 72,398%. Na linha 43, o erro percentual traduziu-se em -22,780%.

A subestimação da linha 43 deveu-se à velocidade média em serviço exceder os 15 km/h, aplicando-se a fórmula [9] de regeneração de energia e autonomia. Como não existe variação da velocidade, sempre que o consumo fosse negativo considerou-se regeneração.

Numa última análise, recorreu-se ao cruzamento entre os resultados, os dados de consumo disponibilizados pelos TUB e os dados da plataforma Viriciti. Pretendeu-se assim avaliar o consumo para o mês de outubro de 2022. Observa-se no quadro 6, o produto desse processo.

Quadro 6 – Consumos estimados no modelo SIG e consumos reais apurados pela operadora e extraídos da plataforma Viriciti, de 01 a 31 de outubro de 2022

	Consumo kWh/km		
	SIG	TUB	Viriciti
Linha 96	1,395	1,252	1,240
Linha 87	1,608	1,277	1,267
Linha 74	1,602	1,231	1,220
Linha 43	0,841	1,026	1,015

A subestimação, face à realidade, da linha 43 foi também identificável neste cruzamento. Entre os resultados e os dados da operadora e da Viriciti, apresentou uma diferença de -0,185 e -0,174 kWh/km, respetivamente. Relativamente à linha 96, revelou-se, novamente, com a diferença mais baixa, com 0,143 e 0,155 kWh/km, respetivamente. No cômputo geral, todos os consumos apresentam-se próximos à realidade, caracterizando-se as diferenças como pouco significativas.

Analisando ambos resultados, e as questões inerentes, considera-se que o modelo, e respetivos *outputs*, apresentou uma performance satisfatória, com consumos aproximados à realidade da operação.

Na figura 16 observa-se o consumo estimado ao longo do percurso da carreira 96.

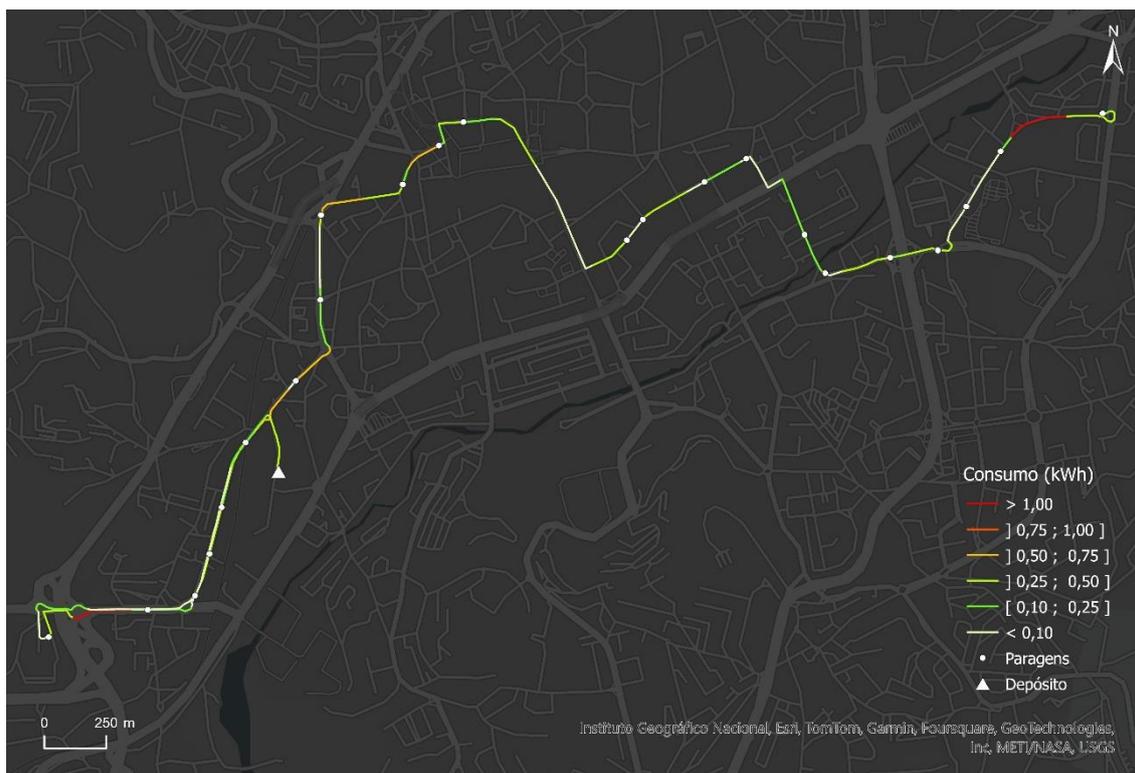


Figura 16 – Consumos estimados, em intervalos de ≈ 250 metros, da saída do depósito e na operação de um sentido – Linha 96 dos TUB, 2022

Com a avaliação satisfatória dos consumos estimados, existiu ainda a testagem de modelar outros cenários sintéticos para avaliar a sensibilidade do modelo e dos fatores de consumo inerentes. Com essas variações, pretendeu-se testar o impacto e o peso de cada fator no consumo e analisar que repercussão que os valores médios tiveram na predição.

Com base na subestimação da linha 43, procedeu-se à modelação com velocidades sintéticas. Este parâmetro pretendeu avaliar o fator de regeneração nos consumos com um limiar na velocidade potenciadora para a regeneração, definida em [9]. Procedeu-se ao uso, em todas as velocidades médias de todas as linhas, de velocidades no limiar da regeneração, nomeadamente os 14,999 km/h e 15 km/h.

Os resultados da linha 43 apresentam-se no quadro 7.

Quadro 7 – Consumos estimados a partir de velocidades médias sintéticas, e respectivas diferenças entre si – Linha 43 dos TUB, 2022

Linha 43				
	SIG - 14,999 km/h	SIG -15 km/h	Δ	Real
Distância (km)	11,289	11,289	0,000	11,900
Consumo (kWh)	12,619	9,582	3,037	12,300
kWh/km	1,118	0,849	0,269	1,034

Utilizando o consumo real como referência, apurou-se que os consumos na linha 43 são superiores ao resultado anterior. Estas diferenças traduzem numa diferença de 3,121kWh, no caso dos 14,999km/h, e 0,084 kWh, nos 15 km/h. Comparando os resultados obtidos das velocidades sintéticas, identificou-se que a variação das velocidades, e do respetivo fator de regeneração, traduz-me numa diferença de 3,037 kWh. Comparando os resultados sintéticos, das velocidades de 14,999 e 15 km/h, com o consumo real, apurou-se um erro percentual de 2,593% e -22,098%, respetivamente. Traduz-se numa diferença de 0,319 e -2,718 kWh. Na figura 17, apresenta-se o consumo a 15km/h.

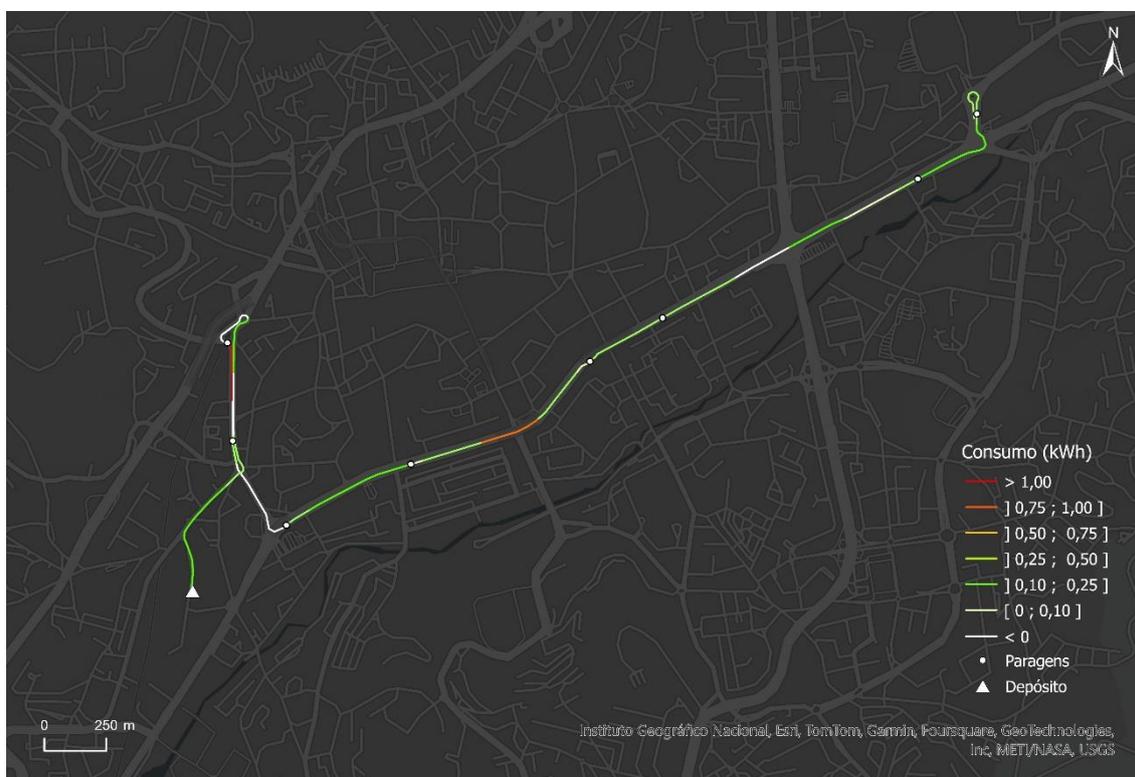


Figura 17 – Consumos estimados com velocidades médias de 15 km/h, de um percurso de saída do depósito e um sentido de operação – Linha 43 dos TUB, 2022

Na figura 18, observa-se o mesmo percurso sem o fator de regeneração [9].

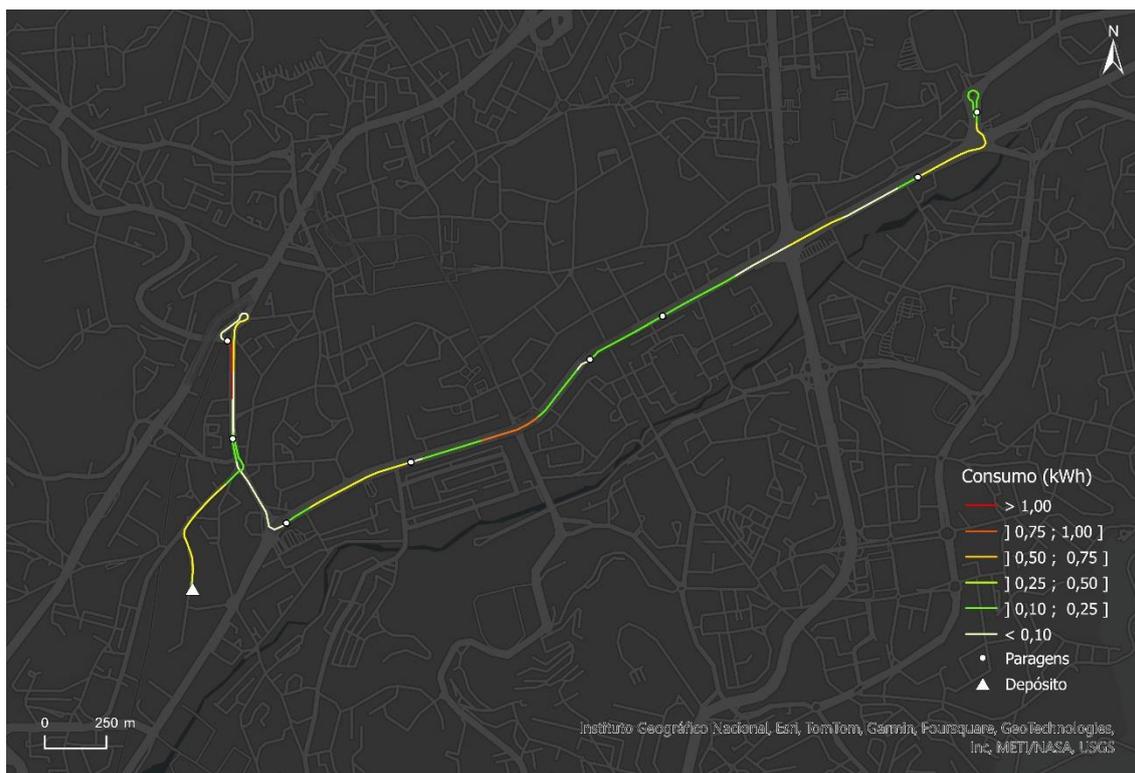


Figura 18 – Consumos estimados com velocidades médias de 14,999 km/h, de um percurso de saída do depósito e de um sentido de operação – Linha 43 dos TUB, 2022

Recorrendo aos consumos na linha 96 como base de comparação e avaliação da análise de sensibilidade, comparou-se os resultados observados no quadro 8 com os resultados abordados anteriormente.

Quadro 8 – Consumos estimados a partir de velocidades médias sintéticas, e respetivas diferenças entre si – Linha 96 dos TUB, 2022

	Linha 96			
	SIG - 14,999 km/h	SIG -15 km/h	Δ	Real
Distância (km)	19,152	19,152	0,000	19,100
Consumo (kWh)	25,672	16,976	8,695	22,850
kWh/km	1,340	0,886	0,454	1,196

Com a inclusão do fator [9], o consumo, relativamente aos resultados do modelo de base, diminuiu em -9,741 kWh, que se traduz numa diferença 0,509 kWh/km. Comparando com o consumo real, a diferença expressou-se em 0,310 kWh/km. O cruzamento entre os resultados sintéticos demonstrou que existe, à semelhança da linha 43, uma evidente subestimação dos consumos face à variação da velocidade para os 15 km/h. Esta manifestou-se numa diferença de 8,695 kWh entre os dois cenários. Estão apresentados os resultados para todas as linhas no Anexo 2.

Na análise do fator de regeneração, evidenciou-se então que a regeneração apresenta um enviesamento dos resultados. Esta subestimação advém, maioritariamente, da utilização contínua de velocidades médias, sem variação, e do espaçamento dos trechos de 250 metros dos percursos. Esse espaçamento gerou, em alguns casos, declividades mais acentuadas do que a realidade. Tendo-se em consideração os fatores de consumo identificados no capítulo II.2, procedeu-se ao cálculo da correlação entre as variáveis, resultado esse presente no quadro 9.

Quadro 9 – Correlação de Pearson entre os consumos e a parametrização do modelo de base

	Distância	Tempo na paragem	Velocidade	Massa	Declive	Consumo
Distância	-					
Tempo na paragem	-0,199	-				
Velocidade	0,141	-0,058	-			
Massa	-0,343	0,283	-0,050	-		
Declive	0,019	-0,145	-0,001	0,007	-	
Consumo	0,339	-0,017	-0,096	0,004	0,685	-

No cômputo geral, a maioria das variáveis apresentou coeficientes de correlação fracos e muito fracos (Singh, 2018). A exceção identificou-se entre os declives e o consumo, onde o coeficiente de correlação foi forte (Singh, 2018). Afirma-se assim que há relação estatística entre estas duas variáveis, sugerindo que as variações nos declives estão associadas a variações nos consumos. Com base na revisão da literatura, evidência causalidade, fomentando o erro oriundo dos espaçamentos dos trechos.

Relativamente à massa, inserida em [10], utilizou-se também variações de capacidade sintéticas. Recorreu-se ao percentil 10, 50 e o percentil 90 da capacidade total do veículo. Utilizando-se um valor de peso médio ao longo do percurso, considerou-se fundamental analisar o impacto que as variações têm nos consumos. Nesta avaliação, à semelhança das velocidades, manteve-se os parâmetros utilizados no modelo de base, variando apenas o peso.

No quadro 10, destaca-se os resultados para a linha 96. Os resultados dos restantes cenários apresentam-se no anexo 3

Quadro 10 – Consumos estimados a partir de taxas de ocupação sintéticas – Linha 96 dos TUB, 2022

	Linha 96			
	10%	50%	90%	Real
Distância (km)	19,152	19,152	19,152	19,100
Consumo (kWh)	23,069	25,314	27,558	22,850
kWh/km	1,205	1,322	1,439	1,196

Recorrendo-se, novamente, à linha 96 como base de comparação e avaliação, a diferença entre o percentil 10 e os consumos reais evidenciou-se em 0,219 kWh, uma precisão de 99,042%. Esta traduziu-se numa discrepância de consumo de 0,009 kWh/km, muito inferior ao que foi observado previamente. Relativamente aos restantes percentis, de 50 e 90, as diferenças associadas são de 2,464 kWh, uma precisão de 89,217% e 4,708 kWh, 79,396%, respetivamente. Contrastando com os resultados do modelo de base, o percentil 10 revelou uma diferença de -3,648 kWh, o percentil 50 de -1,403 kWh e 0,841 kWh no percentil 90.

Analisando os resultados das restantes linhas, identificou-se que os consumos do percentil 10 e 50 aproximaram-se mais aos consumos reais que os resultados do modelo de base, à exceção da linha 43. Como o consumo é influenciado consoante a capacidade, com a inclusão do fator de regeneração a subestimação aumenta. No percentil 10, nas linhas 87 e 74 traduziu-se uma diferença de 1,452 e 2,043 kWh relativamente ao consumo real, respetivamente. No percentil 50, a linha 87 evidenciou uma discrepância de 3,318 kWh, uma precisão de 79,301% em relação à realidade, e na linha 74, de 4,278 kWh e uma precisão de 79,193%. No percentil 90, todos os consumos referentes às linhas foram superiores aos resultados do modelo de base.

As densidades populacionais inerentes às cidades modeladas por Hjelkrem *et al.* (2021) são superiores à realidade de Braga. Mesmo entre Lisboa e Braga, as densidades correspondentes são de 5 454,998 hab/km² e 1 054,114 hab/km², respetivamente. Mesmo não se tendo acesso aos diagramas de carga dos TUB, analisou-se os dados dos Censos 2021 e conclui-se que a diferença entre o número de indivíduos, como principal meio de transporte o autocarro, entre as duas cidades é de 67 176 indivíduos. Posto isto, prevê-se que a percentagem de ocupação seja inferior à utilizada no modelo de base, i.e. 75%, prevendo-se que a baixa diferença entre os consumos estimados e a realidade advenha desse facto, como evidenciou os resultados dos percentis 10 e 50.

Permitindo a utilização do modelo como ferramenta de apoio à monitorização de consumos das frotas, é insuficiente apenas considerar-se um percurso em cada sentido da operação e os dois percursos em vazio. Inclui-se na análise de sensibilidade a integração das frequências, num dia de operação, para todas as linhas. Resulta da multiplicação dos consumos, e respetiva distância percorrida, pela frequência de sentidos percorridos em operação. No caso dos percursos de ida e recolha, considerou-se a ida e recolha diárias mais o número de vezes em que o veículo foi carregar.

No quadro 11, observa-se os resultados e os consumos reais referentes ao dia 03 de outubro de 2022, do veículo 1001. Os consumos das restantes carreiras revelam-se no anexo 4.

Quadro 11 – Consumos estimados com inclusão de frequências da operação e comparação com os consumos reais do histórico da Viriciti – Linha 96 dos TUB, veículo 1001 a 03 de outubro de 2022

Linha 96			
00:00h às 16:00h (5 ciclos)	SIG	Real	Δ
Distância (km)	80,903	80,000	0,903
Total consumo (KWh)	118,809	107,100	11,709
kWh/km	1,469	1,339	0,130
16:00h às 23:00h (3 ciclos)	SIG	Real	Δ
Distância (km)	50,027	49,000	1,027
Total consumo (KWh)	72,763	64,130	8,633
kWh/km	1,454	1,309	0,145

Após ter circulado 10 vezes em cada sentido da operação, contou com um carregamento em depósito, e com uma segunda saída do depósito, até ao término da chapa, realizou mais 6 sentidos, recolhendo ao depósito no final. Na totalidade da operação, o veículo consumiu, no cenário real, 171,230 kWh, num total de 129 km e um consumo de 1,327 kWh.

Cruzando os valores, identificou-se que o erro identificado previamente entre distâncias perpetuou-se e expressou-se em aproximadamente 1 km em cada turno. No primeiro turno, evidenciou-se ligeiramente menor, mesmo com uma frequência mais elevada. Apesar de existirem variações inerentes a pequenas imprecisões nos dados, o peso do parâmetro de saída/recolha à estação diminuirá quanto mais voltas o veículo fizer em operação. Posto isto, quanto mais serviços o veículo efetuar, sem recorrer à estação, mais tender-se-á a aproximar aos valores reais de consumo.

Relativamente aos consumos, detetou-se uma discrepância em ambos os turnos. No primeiro turno, a precisão foi de 89,067%, com uma diferença de 11,709 kWh. No segundo, o traduziu-se numa discrepância de 8,633 kWh, e uma precisão de 86,538%. Na totalidade da operação, incluindo os vazios, de 20,342 kWh, manifestando-se num erro de 11,880%. Em termos de erro entre a estimação da eficiência energética na totalidade da operação, expressou-se em 0,104 kWh/km. Comparando com as diferenças com as discrepâncias referentes aos resultados do modelo de base e o consumo real, a sobrestimação passou de 0,199 kWh/km, no modelo, para 0,130 kWh/km e 0,145 kWh/km, nas frequências. Revelou-se uma redução do erro de estimação de consumos para quase metade.

Procedeu-se ao cálculo do SoC, e respetiva comparação com os valores reais, a partir de,

$$SoC = \frac{C_{aeb}}{A} 100 \quad [12]$$

sendo que A representa a autonomia total do veículo. Para o veículo 1001, da carreira 96, 150 kWh.

No primeiro turno, o SoC estimado traduziu-se em 79,206%. Cruzando-se com o real da operação, verificou-se uma diferença de -3,194%, face ao SoC real de 82,400%. No segundo turno, a diferença manteve-se, reduzindo para -1,491% face ao valor estimado de 48,509% e real de 50%. Esta discrepância advém da diferente fórmula de cálculo do SoC entre o modelo e a Viriciti.

Comparando-se os consumos apenas de um dia e um veículo, não permite uma análise e avaliação detalhada do modelo. Para tal, procedeu-se à individualização de todos os consumos diários, referentes ao mês em análise, da linha 96.

Observa-se no quadro 12, o cruzamento entre o resultado oriundo das frequências e os consumos reais descritos por medidas de estatística descritiva.

Quadro 12 – Consumo estimado do modelo de SIG e respectivo cruzamento entre medidas de estatística descritiva referentes aos consumos reais dos veículos 1001, 1003 e 1006 dos TUB – dias úteis de outubro de 2022

	Linha 96		
	SIG	Real	Δ
max		184,700	6,872
\bar{x}	191,572	151,343	40,229
min		58,620	132,952
σ	-	24,622	-
σ^2	-	606,254	-

O valor máximo de consumo identificado apresentou uma diferença de 6,872 kWh, aumentando substancialmente em relação à média estimada, para 40,229 kWh. Entre os valores máximo e mínimo, identificou-se discrepância de 126,080 kWh. Comparando o valor mínimo e o consumo estimado, a desigualdade é muito superior às identificadas anteriormente, não permitindo uma comparação plausível. Estas diferenças entre máximo e mínimo advêm da grande variabilidade dos consumos e respetivas frequências em operação. Analisando o desvio-padrão, identificou-se uma dispersão considerável em relação à média, evidenciando a variabilidade já identificada, com os valores calculados na variância a reiterarem.

Com base nos resultados estimados de todos os modelos, realizou-se a comparação entre os valores de consumo em relação à realidade, descrito no quadro 13.

Quadro 13 – Consumos estimados do modelo de base e média dos consumos estimados dos modelos de análise de sensibilidade, em kWh/km, para todas as linhas dos TUB – outubro de 2022

	Base	\bar{x} - Análise de sensibilidade	Δ	Δ (\bar{x} total - Real)
96	1,395	1,276	0,119	0,097
87	1,608	1,456	0,152	0,235
74	1,602	1,451	0,151	0,226
43	0,841	0,878	-0,037	-0,161

Na avaliação entre a média dos resultados da análise de sensibilidade e do modelo de base traduziu-se numa variância de 0,006 em relação à diferença das linhas e um desvio-padrão de 0,078. A linha 87 revelou-se com maior discrepância entre os resultados, em 0,152 kWh, e a linha 43 com a menor, com -0,037 kWh/km. A tendência da linha 96, que apresentou as menores diferenças em todos os modelos, expressou-se com uma diferença de 0,119 kWh/km.

Pretendendo-se perceber a integração de todos os resultados num valor médio, calculou-se a média entre todos os modelos, comparando com o consumo real. O desvio das diferenças expressou-se em 0,160, e a variância em 0,026. A linha 96 revelou a menor discrepância, com 0,097 kWh/km. A linha 43, como observou-se na maioria dos modelos, apresentou valor negativos, resultante da velocidade média associada. A linha 87 e 74 demonstrou-se com a maior diferença.

Com base em toda a análise efetuada, recorrendo-se ao modelo de base e à análise de sensibilidade, considerou-se que o modelo apresentou uma capacidade preditiva satisfatória. Os consumos estimados revelaram-se próximos à realidade, tendo-se identificado os fatores que enviesaram os resultados. Consequentemente, considera-se que o modelo apresenta-se como uma boa ferramenta para a estimação de consumos, gestão e planeamento de frotas de AEB.

Nesse sentido, procedeu-se à modelação para a área de operação da Carris de Ferro de Lisboa.

V.2. Lisboa

À semelhança da metodologia adotada na área de operação dos TUB, recorreu-se aos mesmo parâmetros de fatores de consumo e à mesma referência temporal, i.e., dias úteis de outubro de 2022. No caso da Carris, utilizou-se para o modelo de base a velocidade de exploração, para os vazios e a operação, no fator v em [9] e [10], a velocidade de 12,1 km/h. Utilizou-se os 75% da capacidade total, no fator m em [10], para a representação dos passageiros. No caso da temperatura, no fator T_{ext} , em [6] e [7], utilizou-se os dados do INE. Correu-se também um modelo de frequências, aproximando-se à imagem da realidade da operação. Recorreu-se à frequência média de 4,2 por períodos de horas, referente à operação de um dia útil de inverno, das 4h às 21:30h.

Numa análise inicial, modelou-se a carreira 706, a única linha eletrificada na área operacional. No quadro 14, apresenta-se os resultados, comparando-se com os consumos do modelo eULTIMATE.

Quadro 14 – Comparação entre os consumos (kWh/km) estimados no modelo SIG e no modelo de simulação desenvolvido no âmbito do projeto eULTIMATE, referentes à linha 706 – 2022

	Base	Frequência	eULTIMATE
Máximo			1,310
Média	1,493	1,627	1,150
Mínimo			0,590

Procedeu-se à comparação com os resultados do modelo de simulação eULTIMATE. Como observado, previamente, no caso de Braga, evidenciou-se também uma discrepância face aos valores de validação. No modelo de base, a diferença em relação à média expressou-se numa diferença de 0,343 kWh/km. Cruzando-se com o valor máximo, apresentou-se uma diferença de 0,183 kWh/km, e com o valor mínimo de 0,903 kWh/km.

Relativamente ao modelo de frequências, identificou-se um aumento de 8,975%, 0,134 kWh/km, face ao modelo anterior. Este aumento destacou-se principalmente no valor mínimo, numa diferença de 1,037 kWh/km face ao modelo eULTIMATE. No valor médio destacou-se um aumento de 0,477 kWh/km e no máximo 0,317 kWh/km. Calculando-se o SoC resultante da operação, obteve-se um consumo de 59,069%, restando-se uma autonomia de 40,931% face à autonomia total de 280 kWh.

As diferenças identificadas entre os resultados e os valores mínimos revelou uma discrepância significativa. É importante ter-se em conta que a comparação dos consumos entre modelos não é a métrica de avaliação mais fiel. Qualquer modelo, tem um erro associado face à realidade. A comparação deveu-se pela comparação entre os resultados do eULTIMATE com os consumos reais, tendo-se concluído que os resultados se aproximavam à realidade da operação. Outro fator foi que consumos referentes ao modelo eULTIMATE advêm de uma estimação de três dias com diferentes cenários de operação, nomeadamente dias úteis, carreias noturnas e fim de semana. Nos últimos cenários, as velocidades são superiores, e as capacidades e o tempo em operação inferiores aos de dias úteis. Para além disso, a modelação foi feita sobre diagramas de carga e velocidades reais, aproximando os resultados mais à realidade

do que a utilização de valores médios. Utilizou-se ainda outra fonte de informação altimétrica em relação ao modelo em SIG.

Com base nas questões identificadas, foi fundamental a integração da cidade de Braga para pré validar a metodologia utilizada. Na figura 19, observa-se o consumo da carreira 706 ao longo do respetivo percurso.

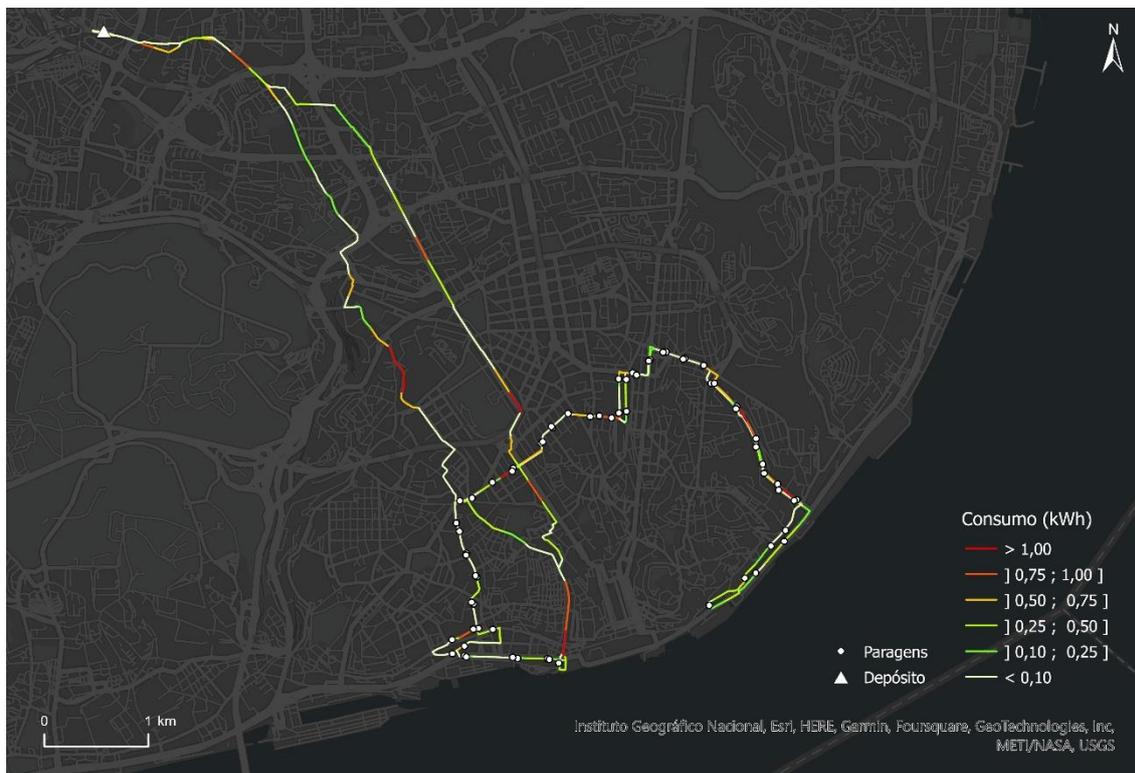


Figura 19 – Consumos estimados no modelo de SIG – Linha 706 da Carris, 2022

À semelhança da modelação realizada para Braga, procedeu-se à modelação dos mesmos cenários como avaliador de análise de sensibilidade do modelo e do caso de estudo. No quadro 15, observa-se os resultados do modelo de análise de sensibilidade.

Quadro 15 – Consumos estimados do modelo de SIG e média dos consumos estimados dos modelos de análise de sensibilidade, em kWh/km, para a linha 706 – outubro de 2022

	SIG - Frequência	\bar{x} - Análise de sensibilidade	Δ	Δ (\bar{x} total - eULTIMATE)
Máximo		1,938	0,311	-0,034
Média	1,627	1,527	-0,100	-0,194
Mínimo		1,058	-0,569	-0,754

Dos resultados dos modelos de análise, realçou-se uma diferença referente ao máximo de 0,311 kWh/km, relativamente ao consumo do modelo das frequências. Este valor máximo adveio da modelação com a velocidade de 14,999km/h, no fator [9] e [10]. No valor mínimo, destacou-se uma diferença de -0,569 kWh/km, referente à velocidade de 15 km/h no fator [10] e regeneração de energia em [9]. Comparando-se à média dos consumos, observou-se uma diferença de -0,100 kWh/km. O valor médio aproximou-se mais do modelo de análise de capacidade de ocupação do veículo de 50%, com 1,547 kWh/km.

Calculando-se a média total entre os resultados dos consumos de ambos os modelos, de 1,344 kWh/km, destacou-se a diferença em relação aos valores mínimos de -0,754 kWh/km. Nas restantes medidas de estatística descritiva, verificou-se também valores superiores face ao modelo eULTIMATE, com -0,194 kWh/km na média, e -0,034 kWh/km no máximo.

As diferenças identificadas e referidas previamente, constaram-se no modelo de análise de sensibilidade dos TUB, nas questões inerentes ao caso de estudo da Carris e do modelo eULTIMATE. Para melhor avaliar a performance do modelo, no caso de Lisboa, requereu-se à Carris os dados de consumo da carreira 706 para o período de referência em análise, i.e., 03 de outubro de 2022. Agrupou-se os consumos dos 15 veículos, excluíram-se consumos abaixo de 100 kWh, por associarem-se a consumos ocasionais, e cruzou-se com os valores de resultado do modelo de frequências. No quadro 16, representa-se os resultados.

Quadro 16 – Consumos estimados e reais da operação da carreira 706, em kWh, referentes ao dia 03 de outubro de 2022

	SIG	Real	Δ
Máximo		197,289	31,896
Média	165,393	168,092	2,699
Mínimo		114,047	-51,346

Analisando as diferenças relativamente à média, a discrepância traduziu-se em 2,699 kWh, um erro de -1,606%. Destacou-se ainda as diferenças relativas ao mínimo, de -51,346 kWh e ao máximo, de 31,896 kWh. À semelhança do caso de estudo de Braga, alcançou-se resultados aproximados à realidade da operação.

Com os resultados satisfatórios dos modelos, procedeu-se à identificação das carreiras de transição à eletrificação, e não transição, da frota da Carris face às suas características atuais de operação. Mantendo-se as frequências vigentes no inverno de 2022, os fatores de consumo utilizados no modelo de base e as características dos veículos existentes, procedeu-se à modelação de todas as carreiras standard, inserido no anexo 5. No quadro 17, observa-se os resultados obtidos para as cinco carreiras com menor consumo estimado.

Quadro 17 – Cinco carreiras da Carris com os menores consumos estimados – 2022

Carreira	kWh	km	kWh/km	SoC consumido	SoC
749	34,636	42,667	0,812	12,370	87,630
776	41,719	28,780	1,450	14,900	85,100
798	48,175	55,258	0,872	17,205	82,795
782	48,431	60,034	0,807	17,297	82,703
725	49,766	41,580	1,197	17,774	82,226

Do total das carreiras modeladas, a 749 (ISEL - Estação Entrecampos) é a carreira que apresentou menor consumo em toda a área de estudo, resultante de velocidade de exploração de 15,3 km/h. Sendo a terceira com menor distância em percurso, beneficiou da proximidade ao parque de recolha da Musgueira, reduzindo a distância em vazios de 11,380 km e 14,973 km em operação. Apresentou-se com um consumo de 34,636 kWh, traduzindo-se em 12,370% de utilização do seu SoC, numa frequência média baixa, de 2,096 vezes. A 776 (Algés - Cruz Quebrada) apresentou o segundo menor consumo, apresentando-se como a carreira com a menor distância percorrida. Revelou um consumo de 41,719 kWh numa frequência média de 3,595 e uma velocidade de 11 km/h. Beneficia da proximidade à Estação de Recolha de Miraflores e de uma distância total em vazio de 5,747 km. Esta carreira apresenta uma tipologia alternativa *mini*. As carreiras 782 (Cais Sodré - Moscavide) e 798 (Campo Grande (Metro) - Galinheiras) aprestaram um consumo estimado muito próximo, com uma diferença de 0,256 kWh. A 725 (Estação Oriente - Prior Velho), a segunda linha com menor distância de percurso, apresentou um consumo estimado de 49,776 kWh. Na figura 20, apresenta-se as cinco linhas com menores consumos estimados.

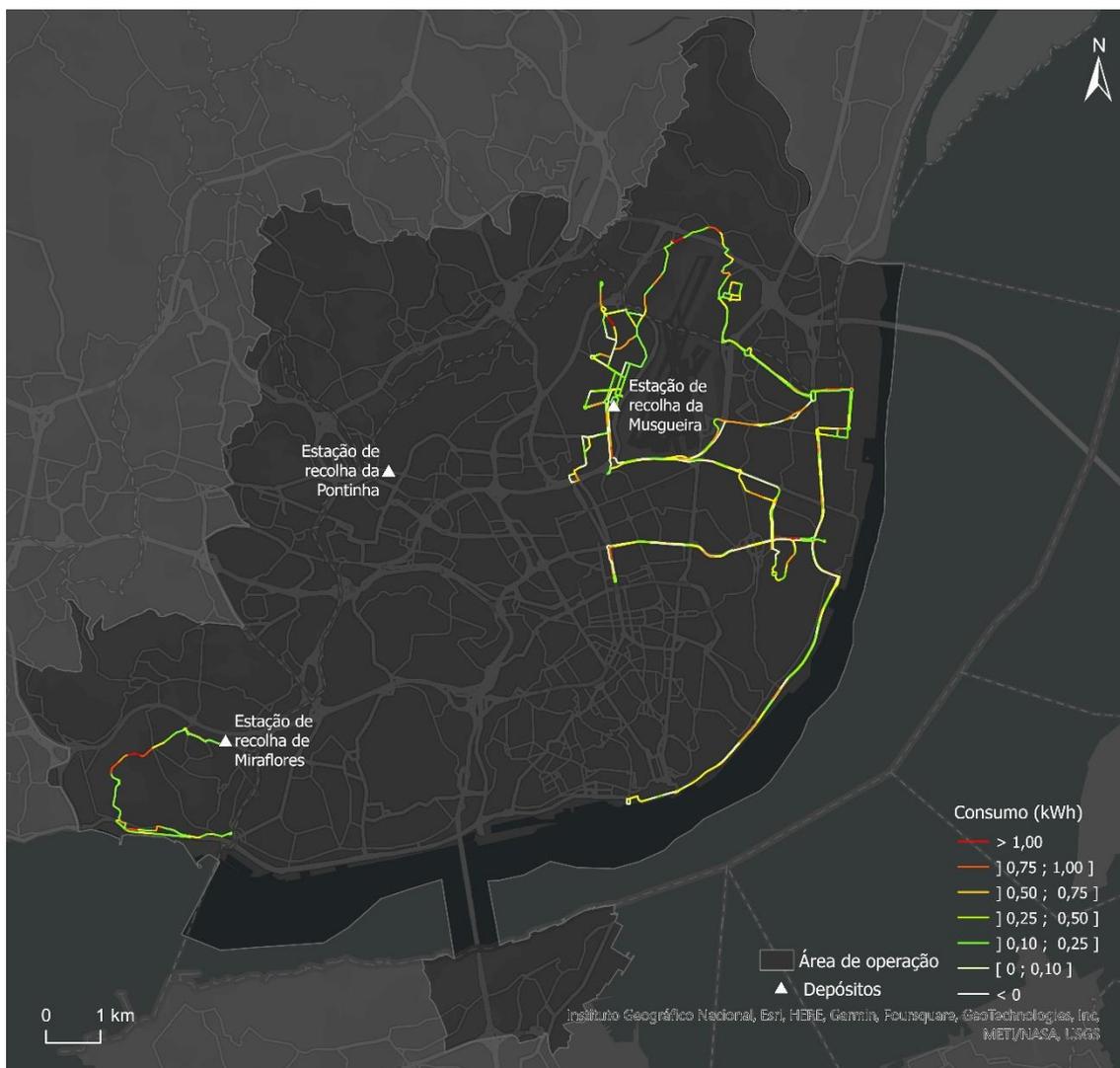


Figura 20 – Cinco linhas da Carris com os menores consumos estimados, a partir do modelo SIG – 2022

A eletrificação das carreiras 798, e parte da 725, beneficiaram na redução e atenuação das emissões em redor da área do Aeroporto de Lisboa, com emissões mais elevadas por conta da aviação. A linha 749, beneficiariam os seus utilizadores, nomeadamente estudantes, devido às características dos seus sentidos de operação, e por circular dentro da ZER 2 numa parte da sua operação. A 782 opera junto da zona ribeirinha do Rio Tejo, circulando maioritariamente nas ZER 1 e 2, critério utilizado na eletrificação da 706. Nenhuma das carreiras identificadas tem como estação de recolha o parque da Pontinha, onde estão, atualmente, localizados os postos de carregamento detidos pela operadora. Porém, com a futura instalação de postos em Miraflores, a carreira 776 apresenta-se como potencial candidata à transição direta na eletrificação.

Do mesmo modo que se isolou as cinco carreiras com menor consumo estimado para uma análise mais detalhada, procedeu-se do mesmo modo para as cinco com maior consumo estimado. No quadro 18, observa-se os resultados.

Quadro 18 – Cinco carreiras da Carris com os maiores consumos estimados – 2022

Carreira	kWh	Km	kWh/km	SoC consumido	SoC
742	357,601	194,462	1,839	127,715	-27,715
727	239,631	144,339	1,660	85,583	14,417
760	219,034	134,587	1,627	78,226	21,774
759	216,873	147,564	1,470	77,455	22,545
758	214,427	130,015	1,649	76,581	23,419

Tendo-se como limiar o intervalo recomendado pelos fabricantes, para o aumento da fiabilidade das baterias, de 20% de SoC, evidenciou-se que as carreiras 742 (B. Madre Deus - Pólo Univ. Ajuda) e 727 (Estação Roma-Areeiro - Restelo), com base nas características atuais de operação e nos fatores utilizados no modelo, não permitem a sua transição direta à eletrificação. A primeira, apresentou um consumo de 357,601 kWh, ultrapassando o limiar recomendado em 47,715%. Na 727, apesar de muito inferior, uma diferença de 42,132% entre ambas, o limiar foi ultrapassado em 5,583%. A 742 apresentou-se como a maior linha do caso de estudo e a 727 a oitava maior, evidenciando-se que a distância não é o maior fator influenciador no consumo.

Nas restantes carreiras, a transição para eletrificação é possível. A 760 (Gomes Freire - Cemitério Ajuda) apresentou-se 1,774% abaixo do limiar, com um consumo de 219,034 kWh. As carreiras 759 (Pç. Figueira - Estação Oriente) e 758 (Cais Sodré - Portas Benfica) apresentaram valores muito próximos, numa diferença de 2,446 kWh e 0,874 % de SoC consumido. Na figura 21, apresenta-se os cinco percursos e os seus respetivos consumos estimados.

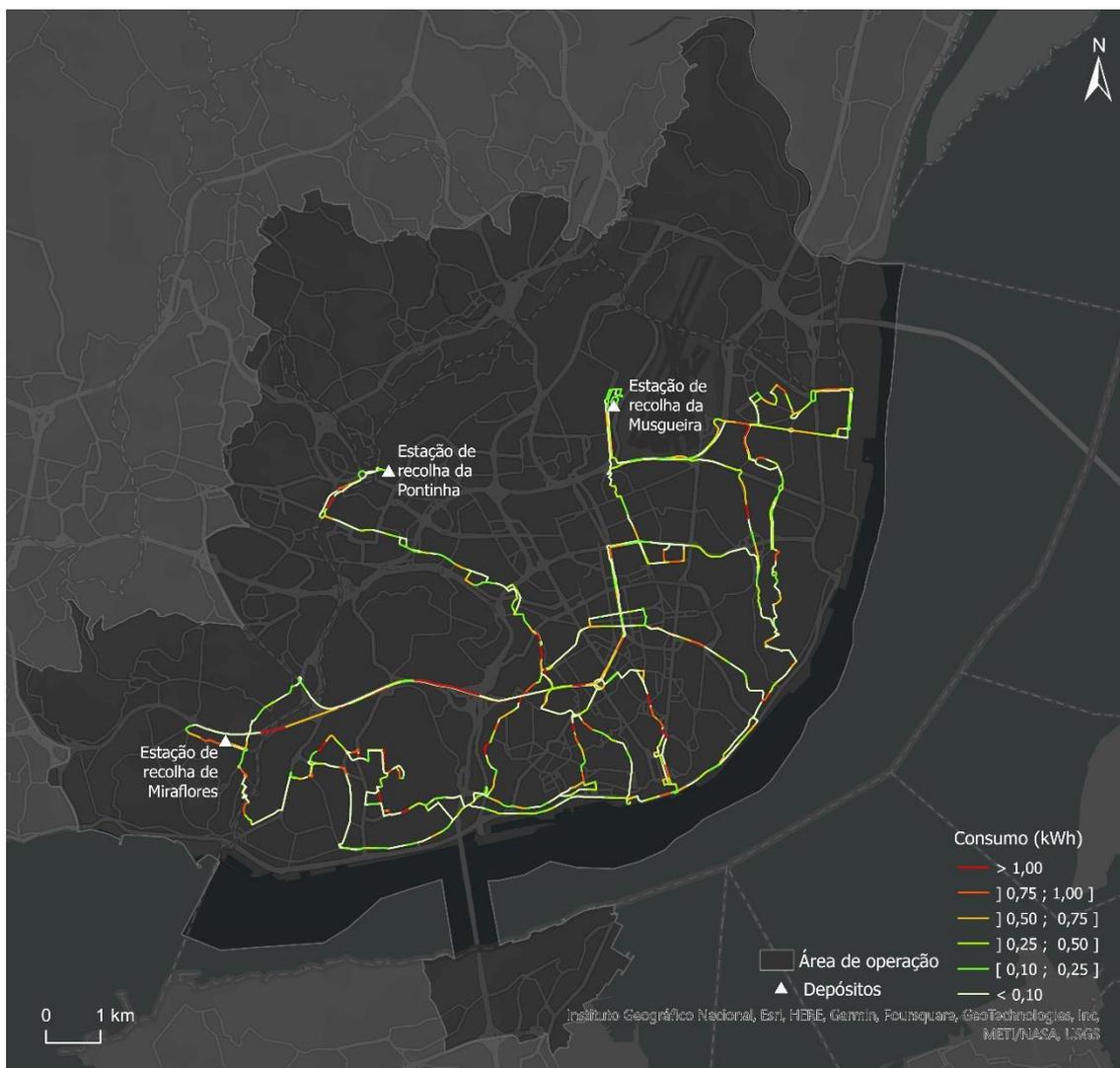


Figura 21 – Cinco linhas da Carris com os maiores consumos estimados, a partir do modelo SIG – 2022

Analisando a malha dos percursos, identificou-se que todas as carreiras circulam e operam sobre a ZER 2. Sobre a ZER 1 operam as carreiras 759 e 760, evidenciando-se uma maior preocupação na eletrificação das mesmas. A 758 apresentou-se como a única carreira, das cinco identificadas, como a mais propícia de ser eletrificada, por ter como estação de recolha atribuída o parque da Pontinha.

Com base no levantamento nas entrevistas à operadora, recolheu-se informação sobre os próximos planos relativos à eletrificação da área operacional da Carris. Uma destas linhas, é a 758.

Das restantes linhas recolhidas, a 767 (Campo Mártires Pátria - Reboleira (Metro)), a operadora tem operado AEB para testes de operação. Da estimação realizada, observou-se que a sua transição é possível, contando com um consumo de 1,360 kWh/km, num total de 212,960 kWh por turno de operação. Prevê-se ainda que o

SoC consumido traduz-se em 76,057%, ligeiramente próximo do limiar definido. Agregado a isso, prende-se a questão de o parque de recolha atribuído ser o da Pontinha.

Nas carreiras em que ainda não se iniciaram testes, a 718 (ISEL - Estação Roma-Areeiro) tem atribuído o parque de recolha da Musgueira. Apresenta características muito similares à linha 749, circulando sobre a ZER 2 e com origem-destino o ISEL. Apresentou um consumo de 1,435 kWh/km, ficando disponível cerca de metade da sua autonomia. A 711 (Sul e Sueste - Alto Damaia) opera sobre o parque florestal de Monsanto e as ZER 2 e 1. A estação de recolha atribuída é Miraflores e apresentou um consumo estimado de 105,099 kWh. Por último, a linha 709 (Restauradores - Campo Ourique) também com recolha em Miraflores, apresenta toda a operação sobre as ZER 2 e 1. Apresentou-se o décimo terceiro consumo mais baixo, com 1,712 kWh/km e um SoC consumido de 29.956%.

À exceção da 742 e da 727, todas as carreiras apresentaram-se como candidatas à transição e/ou total eletrificação. Com a adoção de veículos com maior autonomia, ou alteração das características de operação, a 742 e 727 podem também ser eletrificadas. No caso da 727, a utilização de veículos com autonomia igual ao dos TUB, com 315 kWh, a transição já é possível, resultando um SoC restante de 23,927%

Existe uma necessidade de se repensar a operação e promover a eletrificação, com objetivo na redução das emissões, principalmente nas ZER. Nestas zonas, em Lisboa, a Carris opera um total de 39 carreias, excetuando as que circulam em percursos em vazio, onde apenas uma carreira está totalmente eletrificada.

VI. Considerações finais e trabalho futuro

A eletrificação de frotas de AEB apresenta-se como um passo crucial para a promoção da sustentabilidade e redução de emissões nas áreas urbanas. No entanto, a sensibilidade dos consumos, no contexto da operação dos AEB, apresenta-se como um dos principais fatores a considerar. Na avaliação geral do desempenho do modelo desenvolvido e da informação extraída dos resultados, constatou-se que se desenvolveu uma ferramenta precisa para o auxílio da estimação de consumos e para a transição dos autocarros elétricos a baterias. Este modelo apresentou-se como uma opção valiosa para o apoio às operadoras, tanto durante a transição como na fase operacional dos AEB.

Sinalizou-se que o modelo poderá também ser utilizado como base para decisões na implementação do modelo desenvolvido no âmbito do projeto eULTIMATE, atuando como identificador ou pré-seletor de linhas para uma simulação mais precisa e exaustiva.

Uma das características mais positivas identificadas no modelo foi a possibilidade de modelação sem a necessidade de utilização, ou mesmo a existência, de dados reais de operação. Sendo que, esta característica tornou-se evidente aquando da análise de sensibilidades com dados sintéticos. O modelo permite assim uma estimação aproximada sem qualquer tipo de informação de origem, possibilitando a projeção não apenas dos consumos e do impacto do perfil da operação, mas também da autonomia necessária e da tipologia de frota exigida para uma dada linha ou operação.

A aplicabilidade simples do modelo é outro aspeto relevante, permitindo qualquer operador utilizar a ferramenta, possivelmente em *software open source* como o QGIS. Considerou-se ainda que a sua adaptação é universal, permitindo a estimação em qualquer tipo de frota, como nos casos de estudo da Carris e dos TUB. A adaptação e inclusão de outros fatores de consumo, integração de características adicionais da malha urbana, congestionamentos e restrições no modelo, constituem a sua flexibilidade. Esta capacidade adaptativa proporciona uma contribuição significativa, promovendo eficiência e eficácia nas estimativas, resultando em benefícios tangíveis para a gestão de frotas, operações urbanas e superação de desafios logísticos. Pode ainda servir de uma base para uma análise mais detalhada das vias e/ou carreiras a operarem nas ZER, estimando-se que impactos cada troço tem na operação dos AEB.

Do ponto de vista dos objetivos definidos, analisou-se com sucesso o cenário atual da mobilidade urbana de transportes públicos elétricos, em Portugal, criando-se uma linha cronológica exaustiva da sua progressiva implementação. Para além do número de veículos por operadora, obtiveram-se as características mais específicas da operação, tipologia de veículos elétricos, fatores de consumo, dificuldades e critérios de implementação e operação. De que haja conhecimento, nunca houve tal levantamento em Portugal. Complementou-se esta recolha com uma revisão da literatura existente acerca das vantagens e desvantagens de implementação, fatores e modos de estimação de consumos, identificando-se ainda uma lacuna na utilização dos SIG no processo de planeamento de transição e gestão de frotas elétricas. Face a esta lacuna, conseguiu-se demonstrar a importância do papel dos SIG como ferramentas de apoio e planeamento à transição e implementação dos autocarros elétricos em meio urbano. Os SIG apresentaram-se ainda como potenciador para *feature extraction* de dados de operação, integração de componentes espaciais e alfanuméricas e de modelação de consumos.

A visualização, e respetiva possibilidade de identificação de trechos e os seus consumos inerentes, apresentou-se como uma mais-valia no planeamento e gestão de frotas. Desvendou-se a possibilidade de o operador analisar os trechos, individualmente ou em conjunto, identificando aqueles com menores consumos associados, permitindo a escolha de novos percursos e possíveis alternativas aos percursos existentes. Demonstrou-se ainda a possibilidade da sua utilização no planeamento da malha urbana, identificando-se as vias com menores consumos, tendo sempre ciente a procura, paragens existentes, utilizador alvo e restrições ou limitações de acesso. Neste sentido, criar-se-á ainda modos mais rápidos e competitivos, pela criação de faixas dedicadas à circulação, segregação do modo e priorização dos modos de transportes coletivos sustentáveis.

Embora o modelo desenvolvido represente uma aproximação valiosa à realidade, identificou-se algumas limitações. A utilização da distância de 250 metros para o corte da rede viária, revelou-se um potencial problema, em alguns casos resultou na excessiva acentuação dos declives. Este enviesamento demonstrou-se um fator de sobrestimação dos consumos, associado à resolução do MDE e à disparidade da morfologia da rede viária. A escala de vetorização da informação demonstrou-se também como potencial gerador de diferenças entre as distâncias reais e estimadas, sendo, no entanto, pouco significativas. Essas variações justificam-se ainda pela diferença de comportamentos entre condutores. Cada condutor apresenta um estilo de condução variável, impactando os consumos e a própria distância percorrida. Para além

disso, a partir dos dados dos TUB, em situações ocasionais verificou-se que o condutor pode variar os percursos em vazio, sendo, portanto, um fator importante a modelar. Considerou-se ainda que as distâncias percorridas na estimação mantiveram-se estáticas, revelando uma discrepância face à mutabilidade das distâncias reais.

A utilização de constantes matemáticas (como o coeficiente de eficiência de conversão), retiradas de Hjelkrem *et al* (2021) e do modelo simulação eULTIMATE, apresentou-se como outra possível causa de enviesamento dos resultados. Ainda assim, concluiu-se que os resultados obtidos foram satisfatórios. Sugere-se que em caso de modelação de consumos com maior precisão, sejam utilizadas constantes recolhidas relativamente à área e caso de estudo específico. Por último, deverá considerar-se na parametrização do modelo que existem AEB que ainda utilizam ar condicionado a combustão, independentes dos sistemas elétricos (C. Marques, Comunicação pessoal, 27 de junho, 2023).

Da utilização desta metodologia, existem ainda aspetos a ser tidos em conta. Em situações de proximidade do limiar do SoC, sugere-se a utilização de uma modelação mais precisa e detalhe para viabilizar a decisão e respetiva viabilização da eletrificação das carreiras. Na existência de dados reais de operação, como os diagramas de carga, velocidades reais, chapas e frequências, sugere-se a sua integração no modelo.

Para trabalho futuro, pretende-se realizar a modelação com mais dados reais de operação, avaliando melhor o peso que cada fator de consumo tem no modelo e a sua capacidade de predição. A inclusão da informação de diagramas de carga, simulará melhor a entrada e saída de passageiros, tendo como fator a variação de massa dos veículos. O mesmo acontece com a velocidade, permitindo existir variação no fator, simulando com maior precisão o poder de regeneração da autonomia. Muito associado às constantes, a integração de temperaturas, interior e exterior ao veículo, média diária, permitirá avaliar o verdadeiro impacto da temperatura nos consumos oriundos das unidades de arrefecimento e aquecimento do ar. Espera-se ainda testar a utilização de uma escala mais micro na repartição das distâncias entre trechos da rede viária. A utilização de trechos de 5 metros permitiria estimar, aproximadamente, os consumos de segundo a segundo numa velocidade de 15 km/h. Associado a isso, pretende-se utilizar um MDE com maior resolução. A incorporação dos fins de semana, feriados e carreiras noturnas, das chapas e respetivos horários, crê-se ser necessário e essencial para a representação real das operações e consumos. A recomendação de estimativas mais precisas e detalhadas, baseadas em dados reais, destaca-se como uma estratégia promissora para implementação cada vez mais eficaz do modelo.

Com base nos fatores de consumo identificados, espera-se incorporar na modelação outras variáveis. A integração da localização espacial de semáforos, permitirá representar interrupções na circulação, aumentando o consumo a partir da aceleração. O mesmo para o trânsito, representando tanto a aceleração, como o tempo de consumo nulo em paragem e a baixa velocidade de circulação. A inclusão das faixas BUS permitirá ainda inserir um fator importante na estimação do consumo, como descrito na literatura. Identificou-se, no modelo abordado, a ausência de um coeficiente de degradação das baterias, pretendendo-se desenvolver e incluir, ainda que residual. Considera-se também que a automatização do modelo permitirá a criação de rotinas para a análise de planeamento e avaliação do desempenho das frotas, em especial em operadoras sem acesso a informação de monitorização, como o caso da Guimabus.

Conclui-se assim que este trabalho revela ter um grande potencial para gerar um impacto positivo na construção de uma rede de transportes urbanos mais sustentáveis. A integração dos autocarros elétricos em meio urbano compreende ainda entraves que tem de ser rapidamente ultrapassados, por forma a serem cumpridos os objetivos do Acordo de Paris e dos ODS. Assim, a linha de trabalho aqui iniciada, recorrendo aos SIG, poderá ser um potenciador para o planeamento eficaz, economicamente viável e sustentável desta tipologia de veículos e a modelação da sua operação.

Referências bibliográficas

- Alarrouqi, R., Bayhan, S. & Al-Fagih, L. (2022). Battery Electric Buses Operating in Qatar: A Comprehensive Energy Consumption Analysis. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo, 1236-1241. <https://doi.org/10.1109/ITEC53557.2022.9813924>
- Al-Ogaili, A., Ramasamy, A., Hashim, T., Al-Masri, A., Hoon, Y., Jebur, M., Verayiah, R. & Marsadek, M. (2020). Estimation of the Energy Consumption of Battery Driven Electric Buses by Integrating Digital Elevation and Longitudinal Dynamic Models: Malaysia as a Case Study. *Applied Energy*, 280, 115873. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115873>
- APA (2019). Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 [Roadmap to carbon neutrality 2050]. Agência Portuguesa do Ambiente. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf
- Ayman, A., Wilbur, M., Sivagnanam, A., Pugliese, P., Dubey, A., & Laszka, A. (2020). Data-Driven Prediction of Route-Level Energy Use for Mixed-Vehicle Transit Fleets. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Smart Computing*, 41–48. <https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP50058.2020.00026>
- Barchański, A., Żochowska, R. & Kłós, M.J. (2022) A Method for the Identification of Critical Interstop Sections in Terms of Introducing Electric Buses in Public Transport. *Energies*, 15(20), 1-19. <https://doi.org/10.3390/en15207543>
- Benoliel, P., Jenn, A., & Tal, G. (2021). Examining energy uncertainty in battery bus deployments for transit agencies in California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102963. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102963>
- Boonraksa, T., Boonraksa, P., Sakulphaisan, G. & Marungsri, B. (2020). Strategic Planning of Charging Stations for Electric Public Transportation Bus Systems: a Case Study. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 15(6), 512-520. <http://dx.doi.org/10.15866/iree.v15i6.18764>
- Carris (2020, março, 11). Chegaram os novos Autocarros Elétricos | CARRIS [The new electric buses have arrived | CARRIS] [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=PP5AATfKH7U>

- Carris (2021, agosto). Autocarros Mini Elétricos Já Estão em Teste [Mini electric buses are already being tested]. Carris.pt. <https://www.carris.pt/descubra/noticias/autocarros-mini-eletricos-ja-estao-em-teste/>
- Carris (2022). Plano de Atividades e Orçamento – 2023 [Activity Plan and Budget - 2023]. Companhia Carris de Ferro de Lisboa. <https://www.carris.pt/media/usciqjp5/plano-de-atividades-e-or%C3%A7amento-2023.pdf>
- Carris (2023). Relatório de Sustentabilidade – 2022 [Sustainability Report - 2022]. Companhia Carris de Ferro de Lisboa. <https://www.carris.pt/media/vlioigy1/relat%C3%B3rio-sustentabilidade-2022.pdf>
- Castro, F. (2023, junho). A partir de julho, em Évora só circulam autocarros elétricos [From July, in Évora only electric buses will circulate]. Local Online - ECO - SAPO. <https://eco.sapo.pt/2023/06/22/a-partir-de-julho-em-evora-so-circulam-autocarros-eletricos/>
- Câmara Municipal de Aveiro. (2018, dezembro). Autocarros Elétricos Já Começaram a Circular em Aveiro [Electric buses have already started operating in aveiro]. cm-aveiro.pt. <https://www.cm-aveiro.pt/municipio/comunicacao/noticias/noticia/autocarros-eletricos-ja-comecaram-a-circular-em-aveiro/>
- Câmara Municipal de Braga (n.d.) Empresas Municipais: TUB - Transportes Urbanos de Braga [Municipal Companies: TUB - Transportes Urbanos de Braga] cm-braga.pt. <https://www.cm-braga.pt/pt/0401/municipio/empresas/municipais/item/item-1-410>
- Câmara Municipal de Bragança (2020) Relatórios Públicos Anuais - Serviço Público de Transporte de Passageiros (Anexo) [Annual Public Reports - Public Passenger Transport Service (Annex)]. Câmara Municipal de Bragança. https://www.cm-braganca.pt/cmbraganca2020/uploads/writer_file/document/10198/anexo_informacao_minima_relatorio_anual_2020_mb.pdf
- Câmara Municipal de Leiria. (2023, maio). Leiria conta com dois autocarros elétricos no final do mês [Leiria will have two electric buses by the end of the month]. cm-leiria.pt. <https://www.cm-leiria.pt/municipio/gabinete-de-comunicacao/noticias/noticia/leiria-counta-com-dois-autocarros-eletricos-no-final-do-mes>

Câmara Municipal de Lisboa (2011). Boletim Municipal, 3.º Suplemento ao Boletim Municipal N.º 900, Deliberação n.º 247/CM/2011 (Proposta n.º 247/2011) - Subscrita pelo Vereador Nunes da Silva: Aprovar a criação de uma Zona de Emissões Reduzidas na Cidade de Lisboa, mediante implementação da sua primeira fase em Julho de 2011 no Eixo Avenida Liberdade/Baixa, e desenvolver o estudo da segunda fase (Expansão da ZER a toda a cidade de Lisboa). [Municipal Bulletin, 3rd Supplement to Municipal Bulletin No. 900, Deliberation no. 247/CM/2011 (Proposal no. 247/2011) - Signed by Councillor Nunes da Silva: To approve the creation of a Low Emission Zone in the City of Lisbon, through the implementation of its first phase in July 2011 on the Avenida Liberdade/Baixa axis, and to develop the study of the second phase (Expansion of the LEZ to the whole city of Lisbon)]. https://bmpesquisa.cm-lisboa.pt/pls/OKUL/app_bm.download_my_file?p_file=1460#search=

Chargepoint (n.d.). Terms and Report Parameters. viricityhelp.zendesk.com. <https://viricityhelp.zendesk.com/hc/en-us/articles/8159835165980-Terms-and-Report-Parameters>

Comissão Europeia (2018). Um Planeta Limpo para Todos - Estratégia a longo prazo da UE para uma economia próspera, moderna, competitiva e com impacto neutro no clima. [A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy]. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773>

Comissão Europeia (2019) Pacto Ecológico Europeu [European Green Deal]. EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF

Costa, A., Moreiras, C., Bartolomeu, I. & Valkanova, T. (2022). Estudo de Procura Linha Império – Boavista (BRT) [Demand Study Line Império - Boavista (BRT)]. Metro do Porto. https://www.metroporto.pt/metroporto/uploads/document/file/600/procura_brt.pdf

Eckermann, E. (2001). World History of the Automobile. SAE International. https://www.google.pt/books/edition/World_History_of_the_Automobile/8XZ0EAAQBAJ?hl=pt-PT&gbpv=1&dq=inauthor:%22Erik+Eckermann%22&printsec=frontcover

- Emami, B., Song, Y. & Khani, A. (2022). Prioritizing Bus Routes for Electrification: GIS-Based Multi-Criteria Analysis Considering Operational, Environmental, and Social Benefits and Costs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676, 10-23. <https://doi.org/10.1177/03611981221082565>
- Gabsalikhova, L., Sadygova, G. & Almetova, Z. (2018). Activities to convert the public transport fleet to electric buses. *Transportation Research Procedia*, 36, 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.127>
- Gallet, M., Massier, T., & Hamacher, T. (2018). Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Applied Energy*, 230, 344–356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>
- Gormez, M., Haque, M & Sozer, Y. (2021) Cost Optimization of an Opportunity Charging Bus Network. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(3), 2850-2858. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3061031>
- HF (2022). Grandes Opções do Plano e Orçamento para 2023 [Major Planning Options and Budget for 2023]. HORÁRIOS DO FUNCHAL – TRANSPORTES PÚBLICOS, S.A.: <http://www.horariosdofunchal.pt/images/stories/pdf/relatoriocontas/rechf2021.pdf>
- Hjelkrem, O., Lervåg, K., Babri, S., Lu, C. & Södersten, C. (2021) A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research*, V(94), 102804. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102804>
- IEA. (2016). *Global EV Outlook 2016 Beyond one million electric cars*. IEA Publications. https://iea.blob.core.windows.net/assets/c6fb4849-c171-407e-91de-43d0532c7df9/Global_EV_Outlook_2016.pdf
- IEA. (2023). *Global EV Outlook 2023 Catching up with climate ambitions*. IEA Publications. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>

- IMT (2018a). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes - 2016 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2016]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Noticias/Documents/2018/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20Mobilidade%20Transportes_dados%202016.pdf
- IMT (2018b). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes - 2017 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2017]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Observatorio/Estatisticas/Documents/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20da%20Mobilidade%20e%20dos%20Transportes_2017_revisto.pdf
- IMT (2019). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes - 2018 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2018]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Observatorio/Estatisticas/Documents/AnuarioEstatisticoMobilidadeTransportes_2018_Dez.pdf
- IMT (2020). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes - 2019 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2019]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/IMTT/relatoriosectoriais/Documents/Anu%C3%A1rioEstat%C3%ADsticoMobilidadeTransportes_2019.pdf
- IMT (2021). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes - 2020 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2020]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/IMTT/relatoriosectoriais/Documents/2020_Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20Mobilidade%20Transportes_Final.pdf
- IMT (2023). Anuário Estatístico da Mobilidade e dos Transportes – 2021 [Mobility and Transport Statistical Yearbook - 2021]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I.P. (IMT, I.P.). https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/IMTT/relatoriosectoriais/Documents/Anu%C3%A1rio+Estat%C3%ADstico+Mobilidade+Transportes_2021.pdf

- IMTT (2011) - Coleção De Brochuras Técnicas / Temáticas - Tipologias De Meios E Modos De Transporte [Collection Of Technical / Thematic Brochures - Types Of Means And Modes Of Transport]. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres. https://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Planeamento/DocumentosdeReferencia/PacotedaMobilidade/Documents/Pacote%20da%20Mobilidade/Tipologia%20de%20meios%20e%20modos%20de%20transportes_Mar%C3%A7o%202011.pdf
- Jiang, M., Zhang, Y. & Zhang, Y. (2022). Multi-depot electric bus scheduling considering operational constraint and partial charging: A case study in Shenzhen, China. *Sustainability*, 14,1-20. <https://doi.org/10.3390/su14010255>
- Krawiec, K. (2020). A Concept of Conventional or Mixed Bus Fleet Conversion with Electric Vehicles: A Planning Process. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications* 9(1), 8-12. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.9.1.8-12>
- Krohn, O., Ledbury, M., & Schwarz, H. (2009). Railways and the environment: Building on the Railways' environmental strengths. CER. https://www.cer.be/images/publications/positions/090120_railways_and_the_environment.pdf
- Li, P., Zhang, Y., Zhang, Y. Zhang, K. & Jiang, M. (2021a). The effects of dynamic traffic conditions, route characteristics and environmental conditions on trip-based electricity consumption prediction of electric bus. *Energy*, 218, 119437. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119437>
- Li, P., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, Y. & Zhang, K. (2021b). Prediction of electric bus energy consumption with stochastic speed profile generation modelling and data driven method based on real-world big data. *Applied Energy*, 298, 117204. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117204>
- Lin, K.-C., Lin, C.-N., & Ying, J. J.-C. (2020). Construction of Analytical Models for Driving Energy Consumption of Electric Buses through Machine Learning. *Applied Sciences*, 10(17), 6088. <https://doi.org/10.3390/app10176088>
- Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z.-J, Z. & Miao, L. (2019). Charging Network Planning for Electric Bus Cities: A Case Study of Shenzhen, China. *Sustainability*, 11(17), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su11174713>

- Longo, M., Yaici, W, Foiadelli, F. & Bottari, M. (2018). Next Generation of Recharge Types for Electric Buses. 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607618>
- Lousa, R. (2012). Planeamento E Gestão Operacional De Uma Rede De Transporte Público De Passageiros - Análise de um Caso de Estudo [Planning And Operational Management Of A Public Passenger Transport Network - Analysis Of A Case Study]. [Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto]. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <http://hdl.handle.net/10216/72658>
- MRCagney (2017). Electric Bus Technology - Transport Research Report. MRCagney in association with the Transport and Economic Research Institute. https://www.mrcagney.com/uploads/documents/MRC_Electric_Bus_Report__11072017.pdf
- MOPTC (2010). Glossário de Indicadores - Sector Empresarial do Estado (MOPTC) [Glossary of Indicators - State Business Sector (MOPTC)]. Gabinete de Estratégia e Estudos (GEE). <https://www.gee.gov.pt/pt/documentos/o-gee/sor/1104-glossario-de-indicadores/file>
- Nunes, D. F. (2022, junho). Expresso Porto-Bragança é cobaia dos autocarros elétricos de longa distância [Porto-Bragança Express is test case for long-distance electric buses]. Capital Verde- Eco Sapo. <https://eco.sapo.pt/2022/06/08/expresso-porto-braganca-e-cobaia-dos-autocarros-eletricos-de-longa-distancia/>
- Pamuła, T., & Pamuła, D. (2022). Prediction of Electric Buses Energy Consumption from Trip Parameters Using Deep Learning. *Energies*, 15(5), 1747. <https://doi.org/10.3390/en15051747>
- Ranta, M., Karvonen, V., Potter, J. J., Pasonen, R., Pursiheimo, E., Halmeaho, T., Ponomarev, P. & Pihlatie, M. (2016). Method Including Power Grid Model and Route Simulation to Aid Planning and Operation of an Electric Bus Fleet. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-5. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791724>

- Rádio Alto Minho (2020, janeiro). Mini-Autocarros Elétricos de Viana do Castelo Transportam Mais de Meio Milhão de Passageiros, em 14 Anos [Viana do Castelo's electric minibuses carry over half a million passengers in 14 years]. radioaltominho.pt. <https://radioaltominho.pt/noticias/mini-autocarros-eletricos-de-viana-do-castelo-transportam-mais-de-meio-milhao-de-passageiros-em-14-anos/>
- República Portuguesa (2017). Diário da República, Decreto-Lei n.º 132/2017, Regulamento que Fixa as Dimensões e os Pesos Máximos Autorizados para os Veículos em Circulação, de 11 de outubro de 2017 (Artigo 2.º - Definições e 22.º - Lotação) [Diário da República, Decree-Law no. 132/2017, Regulation Setting the Maximum Authorised Dimensions and Weights for Vehicles in Circulation, of October 11th 2017 (Article 2 - Definitions and 22 - Capacity)]. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2017/10/19600/0563805647.pdf>
- Rios, A., Vargas, C., Guamán, J., & Otorongo, M. (2019). Comparative Analysis of the Energy Consumption, Economic Cost and Environmental Impact between Fossil and Electric Buses in the Public Urban Transportation of the City of Ambato, Ecuador. INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY RESEARCH, 9(2), 944–959. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i2.9238.g7660>
- RTP Madeira (2023, junho, 05). Horários do Funchal quer mais 20 autocarros elétricos [Horários do Funchal wants 20 more electric buses] [Vídeo]. https://www.rtp.pt/madeira/sociedade/horarios-do-funchal-quer-mais-20-autocarros-eletricos-audio_118902
- Siemens (n.d.). On the road with electric power - From the trolleybus to the eHighway. siemens.com. <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/on-the-road-with-electric-power.html>
- Silva, B. (2023, janeiro). Caetanobus Vende Mais 30 Autocarros elétricos à Carris por quase 13 Milhões de Euros [Caetanobus Sells 30 More Electric Buses to Carris for Almost 13 Million Euros]. Jornal de Negócios. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/automovel/detalhe/caetanobus-vende-mais-30-autocarros-eletricos-a-carris-por-quase-13-milhoes-de-euros>

- Singh, M. (2018). Efficient Multi-site Statistical Downscaling Model for Climate Change - A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in GIS and Remote Sensing.[Motilal Nehru National Institute of Technology Allahabad]. ResearchGate <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30863.84644>
- SMTUC (n.d.) História dos Transportes Urbanos em Coimbra [History of Urban Transport in Coimbra], [smtuc.pt. https://www.smtuc.pt/quem-somos/historia-dos-transportes-urbanos-em-coimbra/](https://www.smtuc.pt/quem-somos/historia-dos-transportes-urbanos-em-coimbra/)
- SMTUC (2023a). Relatório de Gestão e Contas e Documentos Financeiros de 2022 [Management report and accounts and financial documents 2022]. Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra. <https://www.smtuc.pt/wp-content/uploads/2023/06/Relatorio-Gestao-2022.pdf>
- SMTUC (2023b). Grandes Opções do Plano e Orçamento para 2023 [Major Planning Options and Budget for 2023]. Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra. <https://www.smtuc.pt/wp-content/uploads/2023/01/Plano-e-Orcamento-2023.pdf>
- STCP (2022). Instrumentos Previsionais de Gestão 2023-2027 [Provisional Management Instruments 2023-2027]. Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, E.I.M.. https://www.stcp.pt/fotos/editor2/Institucional/Governo%20Societario/ipg_23-27_ver12_set_versao_assinada.pdf
- STCP (2023). Relatórios e Contas 2022 [Reports and Accounts 2022]. Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, E.I.M.. https://www.stcp.pt/fotos/editor2/Relat%C3%B3rios%20e%20Contas/stcp_r_c2022.pdf
- Tamaddon, M. & Voodi, M. (2022). A Novel Application of the Travel Profile for the Electrical Bus in Electric Systems for Transportation. 2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE),779-783. <https://doi.org/10.1109/ICEE55646.2022.9827112>
- Transporlis (n.d.) Missão [Mission]. [transporlis.pt. https://www.transporlis.pt/Default.aspx?tabid=305&language=pt-PT](https://www.transporlis.pt/Default.aspx?tabid=305&language=pt-PT)

- TUB (2023). Relatório E Contas 2022.Tub – Uma Alavanca Para A Sustentabilidade [Annual Report 2022.Tub - A Lead For Sustainability]. Transportes Urbanos de Braga. <https://tub.pt/templates/frontoffice/enterprise/pdf/rl2022.pdf>
- UN (2015a). Paris Agreement. United Nations. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- UN (2015b). General Assembly. A/RES/70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- UNECE (2005). Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-Level Ozone. United Nations Economic Commission for Europe. <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/1999%20Multi.E.Amended.2005.pdf>
- Wang, C., Da, X., Gu, C. & Fan, Y. (2022) Planning of Regional Urban Bus Charging Facility: A Case Study of Fengxian, Shanghai. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, V(23), 13592 – 13603. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3125833>
- Wang, S., Lu, C., Liu, C., Zhou, Y., Bi, J., & Zhao, X. (2020). Understanding the Energy Consumption of Battery Electric Buses in Urban Public Transport Systems. *Sustainability* 2020, 12(23), 10007. <https://doi.org/10.3390/su122310007>
- Wei, R., Liu, X., Ou, Y., & Kiavash Fayyaz, S. (2018). Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system. *Journal of Transport Geography*, 68, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>

Anexos

Anexo 1 – Metadados dos dados recolhidos no âmbito do modelo de consumos de autocarros elétricos

Variável	Ano de referência	Formato (tipologia de dados)	Acesso	Fonte: (link)	Sistema de coordenadas	Escala/resolução	Data de publicação ^{a)} e última atualização ^{b)}
Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP2022 (Continente)	2022	Espacial (vetorial)	Público	Direção-Geral do Território: (https://geo2.dgterritorio.gov.pt/caop/CAOP_Continente_2022-shp.zip)	ETRS89/Portugal TM06 (EPSG: 3763)	1 : 25 000	a) 03/02/2023
Consumos médios por veículo e linha, com desagregação diária e mensal - TUB	2022	Alfanumérico	Privado	Transportes Urbanos de Braga	-	-	-
Diagramas de carga, de viagem média, referentes aos dias úteis de inverno das carreiras 758, 29B,32B, 708, 709, 716, 722, 725, 726 e 764 da Carris	2021; 2022; 2023	Alfanumérico	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	-	-	-
Estações de recolha associadas a cada linha da operação da Carris	2022	Alfanumérico	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	-	-	-
Frequências, calculadas por carreira, por períodos de horas (4 às 1:30h), referente à operação em dias úteis de inverno, férias escolares, verão, agosto e madrugada da Carris	2022	Alfanumérico	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	-	-	b) 17/03/2023
General Transit Feed Specification da operação da Carris	22/11/2022	Espacial (vetorial)	Público	Transporlis: (https://www.transporlis.pt/Default.aspx?tabid=314&language=pt-PT&codOp=1)	WGS 1984 (EPSG: 4326)	-	a) 22/11/2022 b) diária
General Transit Feed Specification da operação da Carris	maio de 2023	Espacial (vetorial)	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	WGS 1984 (EPSG: 4326)	-	-
Percursos de todas as carreiras em operação dos TUB	2022	Espacial (vetorial)	Privado	Transportes Urbanos de Braga	WGS 1984 (EPSG: 4326)	-	-
Modelo Digital de Elevação E20N10 - Lisboa	2011	Espacial (raster)	Público	Copernicus: (http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1/view)	ETRS 1989 LAEA (EPSG: 3035)	25 metros	a) 20/04/2016
Modelo Digital de Elevação E20N20 - Braga	2011	Espacial (raster)	Público	Copernicus: (http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1/view)	ETRS 1989 LAEA (EPSG: 3035)	25 metros	a) 20/04/2016
Monitorização de dados reais de operação de autocarros elétricos a bateria dos TUB	2022	Alfanumérico	Privado	ChargePoint Viriciti	-	-	-
Temperatura média do ar (°C) por Localização geográfica (estação meteorológica) e Mês; Anual - Lisboa/Gago Coutinho e Braga/Merelim	2022	Alfanumérico	Público	INE: (https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCo d=0009895&context o=bd&selTab=tab2 &xlang=pt)	-	-	a) 08/10/2019 b) 16/09/2023
Tipologia de frota, e frota alternativa, por carreira da Carris	2022	Alfanumérico	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	-	-	b) 25/05/2023
População residente que vive no alojamento a maior parte do ano (N.º) por Local de residência à data dos Censos [2021] (NUTS - 2013), Sexo, Condição perante o trabalho, Principal meio de transporte e Local de trabalho ou estudo; Decenal	2021	Alfanumérico	Público	INE: (https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCo d=0011704&selTab =tab0)	-	-	a) 21/10/2023 b) 23/11/2022
Rede viária referente com à AML com sentidos de circulação, restrições de acesso, acessos, limites de velocidade e caracterização das vias	2017	Espacial (vetorial)	Privado	HERE	-	-	-
Velocidades médias de exploração e comercial de todas as linhas da Carris	maio de 2022	Alfanumérico	Privado	Carris de Ferro de Lisboa	-	-	-

Anexo 2 - Consumos estimados a partir de velocidades médias sintéticas, e respetivas diferenças entre si, dos autocarros elétricos dos TUB – outubro de 2022

	Linha 96				Linha 87			
	14,999 km/h	15 km/h	Δ	Real	14,999 km/h	15 km/h	Δ	Real
Distância (km)	19,152	19,152	0,000	19,100	12,754	12,754	0,000	12,900
Consumo (kWh)	25,672	16,976	8,695	22,850	20,001	11,161	8,841	16,030
kWh/km	1,340	0,886	0,454	1,196	1,568	0,875	0,693	1,243

	Linha 74				Linha 43			
	14,999 km/h	15 km/h	Δ	Real	14,999 km/h	15 km/h	Δ	Real
Distância (km)	16,377	16,377	0,000	16,500	11,289	11,289	0,000	11,900
Consumo (kWh)	25,441	14,648	10,793	20,560	12,619	9,582	3,037	12,300
kWh/km	1,553	0,894	0,659	1,246	1,118	0,849	0,269	1,034

Anexo 3 - Consumos estimados a partir de taxas de ocupação sintéticas para as linhas elétricas de TUB – outubro de 2022

	Linha 96				Linha 87			
	10%	50%	90%	Real	10%	50%	90%	Real
Distância (km)	19,152	19,152	19,152	19,100	12,754	12,754	12,754	12,900
Consumo (kWh)	23,069	25,314	27,558	22,850	17,482	19,348	21,213	16,030
kWh/km	1,205	1,322	1,439	1,196	1,371	1,517	1,663	1,243

	Linha 74				Linha 43			
	10%	50%	90%	Real	10%	50%	90%	Real
Distância (km)	16,377	16,377	16,377	16,500	11,289	11,289	11,289	11,900
Consumo (kWh)	22,603	24,838	27,074	20,560	8,341	9,053	9,765	12,300
kWh/km	1,380	1,517	1,653	1,246	0,739	0,802	0,865	1,034

Anexo 4 – Consumos estimados com inclusão de frequências da operação e comparação com os consumos reais do histórico da Viriciti – Linhas elétricas dos TUB, por veículo, a 03 de outubro de 2022

Linha 96			
00:00 às 16:00 (5 ciclos)	SIG	Real	Diferença
Km	80,903	80,000	0,903
Total consumo (KWh)	118,809	107,100	11,709
kWh/km	1,469	1,339	0,130

Linha 96			
16:00 às 23:00 (3 ciclos)	SIG	Real	Diferença
Km	50,027	49,000	1,027
Total consumo (KWh)	72,763	64,130	8,633
kWh/km	1,454	1,309	0,146

Linha 87			
00:00 às 19:30 (13 ciclos)	SIG	Real	Diferença
Km	135,057	160,500	-25,443
Total consumo (KWh)	234,978	228,740	6,238
kWh/km	1,740	1,425	0,315

Linha 74			
00:00 às 19:35 (10,5 ciclos)	SIG	Real	Diferença
Km	138,535	151,200	-12,665
Total consumo (KWh)	236,419	222,320	14,099
kWh/km	1,707	1,470	0,236

Linha 43			
00:00 às 19:35 (10,5 ciclos)	SIG	Real	Diferença
Km	246,767	236,600	10,167
Total consumo (KWh)	221,295	245,840	-24,545
kWh/km	0,897	1,039	-0,142

Anexo 5 – Consumos estimados para todas as carreiras da Carris – outubro de 2022

Carreira	kWh	km	kWh/km	SoC consumido	SoC
742	357,601	194,462	1,839	127,715	-27,715
727	239,631	144,339	1,660	85,583	14,417
760	219,034	134,587	1,627	78,226	21,774
759	216,873	147,564	1,470	77,455	22,545
758	214,427	130,015	1,649	76,581	23,419
767	212,960	156,558	1,360	76,057	23,943
717	207,888	153,985	1,350	74,246	25,754
720	175,928	103,510	1,700	62,831	37,169
701	171,319	115,422	1,484	61,185	38,815
732	171,063	118,060	1,449	61,094	38,906
738	169,946	110,204	1,542	60,695	39,305
706	165,393	101,644	1,627	59,069	40,931
713	159,230	103,294	1,542	56,868	43,132
726	158,458	109,750	1,444	56,592	43,408
744	156,351	113,822	1,374	55,840	44,160
703	150,964	114,366	1,320	53,916	46,084
756	144,372	98,165	1,471	51,562	48,438
712	143,166	84,125	1,702	51,131	48,869
793	141,760	89,259	1,588	50,629	49,371
731	138,413	106,403	1,301	49,433	50,567
796	137,080	79,088	1,733	48,957	51,043
755	125,558	145,994	0,860	44,842	55,158
729	124,312	144,724	0,859	44,397	55,603
718	123,687	86,197	1,435	44,174	55,826
708	123,381	143,164	0,862	44,065	55,935
768	123,068	87,592	1,405	43,953	56,047
781	121,966	148,760	0,820	43,559	56,441
735	121,278	91,537	1,325	43,314	56,686
751	118,540	136,369	0,869	42,336	57,664
714	112,998	129,240	0,874	40,356	59,644
764	112,942	78,956	1,430	40,337	59,663
794	111,874	133,308	0,839	39,955	60,045
723	111,452	132,200	0,843	39,804	60,196
747	106,930	73,099	1,463	38,189	61,811
711	105,099	126,936	0,828	37,535	62,465
753	86,887	117,110	0,742	31,031	68,969
754	86,288	94,085	0,917	30,817	69,183
709	83,877	48,999	1,712	29,956	70,044
724	83,738	96,648	0,866	29,906	70,094
716	83,331	65,154	1,279	29,761	70,239
799	72,274	46,051	1,569	25,812	74,188
778	72,037	58,650	1,228	25,727	74,273
705	66,551	78,520	0,848	23,768	76,232
748	63,534	81,165	0,783	22,691	77,309
771	58,873	70,203	0,839	21,026	78,974
725	49,766	41,580	1,197	17,774	82,226
782	48,431	60,034	0,807	17,297	82,703
798	48,175	55,258	0,872	17,205	82,795
776	41,719	28,780	1,450	14,900	85,100
749	34,636	42,667	0,812	12,370	87,630