

MESTRADO
ECONOMIA E GESTÃO DO AMBIENTE

**Mobilidade Sustentável no Porto: Uma comparação entre Light
Rail Train e Bus Rapid Transit**

António Duarte Nunes

M

2025



FACULDADE DE ECONOMIA



Mobilidade Sustentável no Porto: Uma comparação entre Light Rail Train e
Bus Rapid Transit

António Duarte Nunes

Dissertação
Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

Orientado por
Susana Silva

2025

Agradecimentos

A concretização desta dissertação representa o culminar de um percurso exigente e enriquecedor, que não teria sido possível sem o apoio, a orientação e a presença de várias pessoas a quem desejo expressar a minha mais profunda gratidão.

Em primeiro lugar, um agradecimento especial à minha orientadora, Professora Doutora Susana Silva. A sua orientação científica rigorosa, a confiança que depositou no meu trabalho, desde o início, e a disponibilidade constante foram pilares fundamentais para o desenvolvimento desta investigação, as nossas reuniões foram sempre um estímulo intelectual que me desafiou a aprofundar a análise e a elevar a qualidade do trabalho.

Gostaria, também, de expressar um sincero reconhecimento à Professora Doutora Cristina Chaves. O seu incentivo e a forma como me motivou nas unidades curriculares que lecionou foram determinantes para o meu crescimento académico. A sua capacidade de inspirar e de "puxar" pelos alunos, talvez sem se aperceber do seu impacto profundo, foi uma verdadeira lição.

No plano pessoal, uma palavra de imensa gratidão ao Filipe. Pelo apoio incondicional nos momentos mais exigentes, tanto académicos como pessoais, por exaltar o meu valor quando eu mais precisava e por ser uma fonte constante de incentivo para persistir e continuar.

À minha Mãe, dedico este empenho. Faltam-me as palavras para definir o agradecimento por uma vida de ajuda, suporte e amor incondicional. Esta tese é, também, uma prova do "miúdo" que ajudaste a crescer e a formar.

À minha família, um obrigado por todo o apoio. Em especial aos meus irmãos: ao Ricardo, por ter sido sempre um modelo a seguir, e ao Manuel, que este percurso te sirva de exemplo de que a ambição se constrói passo a passo, com trabalho e determinação.

Aos meus amigos, que celebraram cada conquista e amenizaram cada obstáculo, deixo um agradecimento coletivo e sentido. A vossa presença tornou o caminho mais leve e significativo. Neste percurso, uma menção especial à minha amiga Mariana. Partilhámos meses de trabalho intenso, frustrações e lágrimas, cada um na sua dissertação. O meu percurso chegou agora ao fim, e sei que o teu se seguirá prontamente.

Por fim, um agradecimento à Biblioteca Municipal Florbela Espanca, que se tornou a minha segunda casa desde janeiro. Obrigado pela forma como sempre me receberam e pelo ambiente de trabalho que me proporcionaram, dia após dia.

Resumo

A transição para uma mobilidade urbana sustentável é um pilar central para atingir as metas de neutralidade carbónica. No contexto da cidade do Porto, a implementação de um sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) a hidrogénio verde surge como uma nova solução, suscitando um debate sobre a sua competitividade face ao já consolidado sistema *Light Rail Transit* (LRT) do Metro do Porto. Esta dissertação realiza uma análise comparativa multidimensional entre os dois sistemas, avaliando a sua sustentabilidade sob os pilares económico, ambiental e social.

A metodologia adotada combina uma abordagem de métodos mistos. A análise económica baseia-se no Custo Total de Propriedade (TCO) para um horizonte de 30 anos, enquanto a análise ambiental quantifica as emissões de Gases com Efeito de Estufa (gCO₂e/pax-km) segundo a norma EN 16258. A dimensão social é explorada através de um inquérito por questionário a 100 utilizadores, cujos dados foram analisados com recurso a estatística descritiva e inferencial (teste t para amostras emparelhadas).

Os resultados indicam que o LRT, apesar de um TCO nominal superior, apresenta um custo por passageiro-capacidade cerca de 46% inferior ao do BRT (0,13 € vs. 0,24 €), revelando-se economicamente mais eficiente para corredores de alta procura. Ambientalmente, o LRT alimentado por fontes renováveis demonstra ser a opção com menor pegada de carbono. Socialmente, embora ambos os sistemas apresentem níveis de aceitação semelhantes, o LRT é percebido como gerador de um maior benefício social.

Conclui-se, no entanto, que não existe uma solução universalmente superior. O LRT afirma-se como a escolha mais robusta para eixos estruturantes, enquanto o BRT a hidrogénio representa uma alternativa tecnológica inovadora e flexível. A escolha ótima depende do contexto específico de cada corredor, e o futuro da mobilidade sustentável no Porto beneficiará da integração inteligente de ambos os sistemas.

Palavras-chave: Mobilidade Sustentável, Light Rail Transit (LRT), Bus Rapid Transit (BRT), Hidrogénio Verde, Análise de Custo Total (TCO), Sustentabilidade.

Abstract

The transition to sustainable urban mobility is a central pillar for achieving carbon neutrality goals. In the context of the city of Porto, the implementation of a green hydrogen-powered Bus Rapid Transit (BRT) system emerges as a new solution, sparking a debate on its competitiveness against the well-established Light Rail Transit (LRT) system of Metro do Porto. This dissertation conducts a multidimensional comparative analysis of the two systems, assessing their sustainability based on the economic, environmental, and social pillars.

The methodology employs a mixed-methods approach. The economic analysis is based on the Total Cost of Ownership (TCO) over a 30-year horizon, while the environmental analysis quantifies Greenhouse Gas emissions ($\text{gCO}_2\text{e/pax-km}$) according to the EN 16258 standard. The social dimension is explored through a survey of 100 users, with data analyzed using descriptive and inferential statistics (paired samples t-test).

The results indicate that the LRT, despite a higher nominal TCO, has a cost per passenger-capacity that is 46% lower than the BRT (0,13 € vs. 0,24 €), proving to be more economically efficient for high-demand corridors. Environmentally, the LRT powered by renewable sources is shown to be the option with the lowest carbon footprint. Socially, although both systems show similar levels of acceptance, the LRT is perceived as generating greater social benefit.

We can conclude, however, that there is no universally superior solution. The LRT establishes itself as the more robust choice for structural corridors, while the hydrogen BRT represents an innovative and flexible technological alternative. The optimal choice depends on the specific context of each corridor, and the future of sustainable mobility in Porto will benefit from the intelligent integration of both systems.

Keywords: Sustainable Mobility, Light Rail Transit (LRT), Bus Rapid Transit (BRT), Green Hydrogen, Total Cost of Ownership (TCO), Life Cycle Assessment.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3.	Estrutura da Dissertação	2
2.	Revisão da Literatura	4
2.1	Introdução à Mobilidade Sustentável.....	4
2.2	Conceito de Light Rail Train.....	5
2.3	Evolução e Implementação do LRT	7
2.4	Sustentabilidade do LRT	8
2.4.1.	Sustentabilidade Ambiental	8
2.4.2.	Sustentabilidade Económica	12
2.4.3.	Sustentabilidade Social	16
2.5	Conceito de Bus Rapid Transit.....	17
2.6	Evolução e Implementação do BRT.....	18
2.7	Sustentabilidade do BRT.....	19
2.7.1.	Sustentabilidade Ambiental	19
2.7.2.	Sustentabilidade Económica	23
2.7.3.	Sustentabilidade Social	27
2.8	O Papel do Hidrogénio na Mobilidade Urbana	28
3.	Metodologia.....	31
3.1	Abordagem da Investigação e Desenho do Estudo.....	31
3.2	Questões de investigação e hipóteses	31
3.3	Procedimentos de Recolha de Dados	32
3.3.1.	Recolha de Dados Secundários.....	32
3.3.2.	Recolha de Dados Primários	32
3.4	Procedimentos de Análise de Dados	33
4.	Análise dos dados e discussão	35
4.1	Pressupostos LRT e BRT.....	35
4.2	Sustentabilidade Económica	37
4.2.1.	CAPEX BRT.....	39
4.2.2.	OPEX BRT	39
4.2.3.	Valor residual BRT	41
4.2.4.	Cálculo TCO BRT	42

4.2.5.	CAPEX LRT	42
4.2.6.	OPEX LRT	43
4.2.7.	Valor residual LRT	44
4.2.8.	Cálculo TCO LRT	45
4.2.9.	Discussão da Sustentabilidade Económica.....	45
4.3	Sustentabilidade Ambiental	46
4.3.1.	Cálculo da Sustentabilidade Ambiental LRT	46
4.3.2.	Cálculo da Sustentabilidade Ambiental BRT.....	48
4.3.3.	Discussão da Sustentabilidade Ambiental	49
4.4	Sustentabilidade Social	51
4.4.1.	Caracterização da amostra	52
4.4.2.	Análise dos fatores de Escolha de Transporte.....	53
4.4.3.	Perceção sobre o Metro do Porto e o Metrobus.....	53
4.4.4.	Análise comparativa direta: Metro vs Metrobus	54
4.4.5.	Análise dos índices de Aceitação (IA)	55
4.4.6.	Análise do Benefício Social Percebido (IBS).....	57
4.4.7.	Discussão da Sustentabilidade Social	58
5.	Conclusão	59
5.1	Síntese dos Principais Resultados	59
5.2	Implicações para a Política de Mobilidade	60
5.3	Limitações do Estudo e Sugestões para Investigação Futura	61
6.	Bibliografia	62
7.	Anexos	73

1. Introdução

1.1 Contextualização

Para que Portugal alcance a neutralidade carbónica até 2050, é essencial descarbonizar o setor dos transportes, responsável por aproximadamente 29% das emissões totais de Gases com Efeito de Estufa (GEE) em 2022. Enquanto setores como a Indústria, a Energia e a Agricultura reduziram as suas emissões desde 1990, o setor dos transportes registou um aumento de cerca de 57% no mesmo período (European Commission, 2023).

Face a este panorama, a mobilidade sustentável emerge como uma prioridade nas políticas urbanas, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE e mitigar as alterações climáticas, mas também de assegurar que as necessidades de mobilidade da população não sejam comprometidas. A consecução deste objetivo implica uma transformação cultural e tecnológica, substituindo progressivamente o transporte rodoviário individual a combustíveis fósseis por alternativas mais ecológicas, como a mobilidade ativa (bicicleta e caminhada), veículos elétricos, partilha de viaturas e transportes públicos de zero emissões (Marzolla et al., 2024).

Simultaneamente, observam-se, a nível global, múltiplas experiências em cidades que têm implementado soluções inovadoras que conciliam a acessibilidade com a sustentabilidade ambiental, promovendo ambientes urbanos mais seguros e resilientes (Guedes de Paiva et al., 2024). No caso da cidade do Porto, o panorama urbano revela desafios e oportunidades interligados: por um lado, a área metropolitana lida com congestionamentos e emissões elevadas; por outro, conta com uma rede de transporte público em expansão e vontade política de transição energética. É neste contexto que ganha relevância a comparação entre dois modelos de transporte coletivo de média-alta capacidade considerados sustentáveis: o metro ligeiro de superfície (LRT) representado pelo Metro do Porto e o Metrobus (BRT), cuja implementação - através de tecnologia movida a hidrogénio – está em curso no âmbito do projeto Metrobus do Porto.

Nas últimas décadas, a transição para uma mobilidade sustentável tem assumido um papel central nas políticas urbanas europeias, impulsionada, sobretudo, pela necessidade de reduzir as emissões de GEE e de descarbonizar o setor dos transportes. No contexto da

cidade do Porto, apesar do Metro do Porto ter-se afirmado como uma solução sustentável consolidada, a recente decisão de implementar o Metrobus no Porto suscitou debates intensos. Críticas emergem relativamente à questão de saber se a aposta num sistema BRT a hidrogénio representará um avanço tecnológico e ambiental ou se, pelo contrário, constituirá um retrocesso face aos resultados já alcançados com o LRT. Assim, coloca-se a seguinte questão: será que a implementação do Metrobus a hidrogénio contribuirá efetivamente para a mobilidade sustentável e a descarbonização do setor dos transportes, ou seria mais benéfico continuar a investir na expansão e melhoria do sistema de metro ligeiro?

1.2 Objetivos

Considerando o presente estudo propõe-se, num primeiro momento, a avaliar de forma comparativa a viabilidade e a sustentabilidade de dois sistemas de transporte coletivo de média-alta capacidade – *Bus Rapid Transit* e *Light Rail Transit* - tendo em conta os três pilares da sustentabilidade:

- (i) Económica, através do cálculo do *Total Cost of Ownership* de ambos os sistemas, o que envolve quantificar o capital inicial e os custos de operação num horizonte de 30 anos.
- (ii) Ambiental, através da quantificação das emissões de GEE por passageiro-km
- (iii) Social, avaliando impactos sobre acessibilidade, inclusão, qualidade de vida dos utentes e a perceção dos utilizadores através de inquéritos

Estas três vertentes desdobram-se nas questões de investigação QI1-QI3 e respetivas hipóteses H1-H3, apresentadas no capítulo de Metodologia, que guiam a recolha e análise de dados. Acredita-se que os resultados desta pesquisa poderão contribuir de forma decisiva para o desenvolvimento de futuros projetos em Portugal, bem como para a melhoria da mobilidade sustentável e para o delineamento de estratégias de descarbonização do setor dos transportes, tanto a nível regional como nacional.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta a introdução, contextualizando o tema, explicitando os objetivos do estudo e justificando a sua relevância. O segundo capítulo corresponde à revisão da literatura, onde são explorados os conceitos de mobilidade sustentável, os sistemas de *Light Rail Train* e *Bus*

Rapid Transit, bem como a sua evolução, implementação e análise de sustentabilidade nos domínios ambiental, económico e social. O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, incluindo a abordagem de investigação, as questões e hipóteses formuladas, os procedimentos de recolha e análise de dados. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com base nos dados recolhidos, com enfoque nas dimensões de sustentabilidade dos sistemas analisados. Por fim, o quinto capítulo reúne as principais conclusões, implicações políticas, limitações do estudo e sugestões para investigações futuras.

2. Revisão da Literatura

2.1 Introdução à Mobilidade Sustentável

O conceito de mobilidade sustentável deriva diretamente do conceito mais abrangente de desenvolvimento sustentável, que se refere ao “desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (World Commission on Environment, 1987). Neste contexto, a mobilidade sustentável ultrapassa a simples redução das emissões poluentes, implicando a criação e gestão de sistemas de transporte capazes de responder às necessidades atuais sem prejudicar as gerações futuras. Neste sentido, Gallo e Marinelli (2020) salientam que o conceito de mobilidade sustentável implica uma abordagem integrada, harmonizando os fatores ambientais, económicos e sociais. Na dimensão ambiental, a mobilidade sustentável envolve a redução da dependência dos combustíveis fósseis e a diminuição das emissões de GEE, nomeadamente dióxido de carbono (CO₂). Do ponto de vista económico, pressupõe a promoção de modos de transporte eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis a longo prazo. Por fim, na vertente social, procura garantir a acessibilidade universal, segurança e inclusão social, abrangendo todas as camadas da população.

Ackrill e Zhang (2020) sublinham a urgência de transformar o setor dos transportes para cumprir as metas climáticas. O IPCC destaca que limitar o aquecimento global a 1,5°C exigirá reduções drásticas nas emissões de transporte até meados do século. A União Europeia através do *European Green Deal*, reconhece que a descarbonização dos transportes é essencial para que a mesma consiga atingir emissões líquidas zero em 2050. Nesse contexto, políticas públicas têm incentivado a eletrificação de veículos, a adoção de biocombustíveis, subsídios ao hidrogénio, bem como o fortalecimento dos transportes públicos e da mobilidade ativa.

No âmbito urbano, as políticas de mobilidade sustentável incluem: restrições ao uso do automóvel, melhoria dos transportes públicos em termos de cobertura e qualidade de serviço, integração intermodal (facilitando combinações de comboio, metro, autocarro, bicicleta), e investimentos em infraestrutura ciclável e pedonal. As inovações tecnológicas também têm um papel importante – desde veículos elétricos ou a hidrogénio, até sistemas inteligentes de gestão de tráfego e serviços de partilha (*carsharing*, *bikesharing*). Estas medidas visam não só

reduzir as emissões e a poluição do ar, mas também aumentar a eficiência do sistema de transportes e melhorar a qualidade de vida urbana.

Abdullahi e Adnan (2024) enfatizam que a melhoria dos sistemas de transporte público, quando associada a políticas de ordenamento territorial e investimentos em infraestruturas para mobilidade ativa, pode resultar numa significativa melhoria da qualidade de vida urbana, enquanto estimula o desenvolvimento económico local como demonstrado em cidades europeias, como Copenhaga e Amesterdão, em que as políticas de incentivo à mobilidade sustentável podem reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e, consequentemente, as emissões de GEE, promovendo uma maior resiliência dos sistemas urbanos .

Os investimentos em transportes públicos são, também, amplamente reconhecidos como elementos fundamentais nas estratégias urbanas voltadas à mitigação das externalidades negativas geradas pelo uso excessivo de automóveis. Entre essas externalidades, o congestionamento e a poluição destacam-se como as que mais impactam negativamente tanto a economia quanto a qualidade da vida da sociedade. O congestionamento urbano, por exemplo, ocasiona prolongados períodos de engarrafamento, afetando não apenas os condutores, mas também os pedestres, que são expostos a elevados níveis de ruído e poluição atmosférica. Os prejuízos económicos decorrentes desses congestionamentos são substanciais, sobretudo devido à perda de tempo, um recurso de valor inestimável, e ao aumento do consumo de combustíveis, o que intensifica os impactos económicos e ambientais (Gunawan, 2021). Conforme um estudo recente da European Commission (2020), os atrasos gerados pelo tráfego rodoviário nos países membros da União Europeia implicam um custo anual de 271 mil milhões de euros. Além disso, as emissões de poluentes – maioritariamente atribuídas ao tráfego automóvel – figuram como a principal causa de aproximadamente 3,3 milhões de mortes por ano em todo o mundo, superando, assim, as taxas combinadas de mortalidade associadas a doenças como a SIDA, malária e a gripe (Lelieveld et al., 2015).

2.2 Conceito de Light Rail Train

O LRT, também conhecido como metro ligeiro de superfície, constitui um sistema de transporte ferroviário urbano de média capacidade que opera sobre carris, habitualmente ao nível da rua, mas pode incluir trechos elevados ou subterrâneos em áreas de maior densidade. Ao contrário dos sistemas ferroviários pesados, como metros e comboios suburbanos, os

veículos LRT são mais leves e de menores dimensões, alimentados eletricamente, geralmente através de cabos aéreos ou por sistemas de energia ao nível do solo (Teodorović & Janić, 2017). Graças à eficiência, acessibilidade e sustentabilidade ambiental, o LRT contribui para a redução do congestionamento e das emissões de carbono. Pode circular tanto em vias exclusivas como em ruas partilhadas com o tráfego automóvel, garantindo uma maior flexibilidade, além disso, integra também plataformas de embarque niveladas o que promove a inclusão de passageiros com mobilidade reduzida (Reis, 2011).

De acordo com o relatório do European Metropolitan Transport Authorities (2021), é estabelecida uma distinção entre o LRT e os sistemas de elétrico modernos (*tram*), o metro e o comboio. O relatório defende que o *light rail* constitui uma forma híbrida destes três modos de transporte, englobando sistemas de elétrico, combinações de elétrico e comboio, bem como de elétrico e metro. Tanto o elétrico como o LRT encontram-se integrados no ambiente urbano, no entanto, os sistemas de *light rail* tendem a apresentar um menor número de passagens de nível, maior prioridade de circulação e sistemas de sinalização mais desenvolvidos. A distância entre paragens no LRT é, em geral, também superior. Por outro lado, os sistemas de metro revelam diferenças significativas face aos modos anteriores, operando sempre em via segregada, sem passagens de nível e com utilização sistemática de sinalização. Ainda assim, a distância entre paragens no metro é, em termos gerais, semelhante à observada nos sistemas de *light rail* (International Association of Public Transport, 2023). No contexto específico do Metro do Porto, observa-se uma diversidade de regimes operacionais resultante das condicionantes morfológicas e funcionais dos territórios que atravessa. Na zona central da cidade, o sistema comporta-se, em grande medida, como um metro convencional: o traçado desenvolve-se quase integralmente no subsolo, totalmente segregado do tráfego rodoviário e pedonal, sem passagens de nível. À medida que se prolonga para a zona suburbana, assume-se um perfil híbrido entre elétrico moderno e metro ligeiro, combinando trechos à superfície, na sua maioria segregados, com cruzamentos de nível pontuais e controlados. Por fim, no troço de Matosinhos, a operação aproxima-se do paradigma de elétrico moderno, decorrendo predominantemente à superfície, com múltiplas interseções ao nível e partilha do espaço viário com o tráfego automóvel e peões, sem barreiras físicas de segregação.

2.3 Evolução e Implementação do LRT

O conceito de LRT, remonta aos sistemas de elétricos urbanos do final do século XIX e início do século XX. Muitas cidades europeias e norte-americanas contavam com redes extensas de elétricos até meados do século XX, quando a concorrência do automóvel e dos autocarros convencionais levou ao declínio ou encerramento de muitos desses sistemas devido a razões económicas. A partir de meados de 1980, contudo, observou-se uma revitalização do LRT: diversas cidades começaram a reintroduzir elétricos modernos/metros ligeiros como alternativa sustentável de transporte público. Na França, por exemplo, apenas quatro cidades mantinham elétricos em operação em 1980, mas nas três décadas seguintes cerca de 25 cidades francesas revitalizaram as suas redes de elétrico colocando veículos mais modernos em circulação (Krebs, 2022).

Durante grande parte do século XX, a cidade do Porto contava com um sistema de elétricos que, semelhante ao resto da Europa, foi progressivamente desativado entre as décadas de 1960 e 1970, sendo substituído por autocarros pelas mesmas razões económicas. Contudo, o aumento do uso do automóvel tornou os autocarros menos eficientes devido ao congestionamento urbano, agravando os problemas de tráfego o que contribuiu para diversas externalidades negativas, como impactos económicos, sociais e ambientais. Em 1989, a Sociedade de Transportes Coletivos do Porto (STCP) iniciou a procura por soluções de transporte público mais eficientes, culminando na escolha do LRT por três razões principais: a flexibilidade para combinar trechos subterrâneos no centro histórico com percursos de superfície nos subúrbios, a oportunidade de requalificação urbana e a tendência europeia de revitalização dos sistemas elétricos urbanos (Pinho & Vilares, 2009).

No entanto, a expansão do Metro do Porto enfrentou desafios políticos. As decisões estratégicas ficaram a cargo da Junta Metropolitana do Porto, composta pelos presidentes das 17 câmaras municipais da região. Esse modelo de governação criou conflitos de interesse, uma vez que cada autarca procurava direcionar o investimento para o seu município, muitas vezes em detrimento da eficiência do sistema. Como resultado, algumas das áreas com maior procura ficaram insuficientemente servidas, enquanto outras, menos prioritárias em termos de mobilidade, receberam infraestrutura antes do necessário. Esta situação afetou particularmente Vila Nova de Gaia, o município vizinho com maior população, que apenas conta com uma linha de metro. O mesmo ocorreu com Gondomar, que só recebeu uma

ligação em 2011 (Pinho e Vilares, 2009). Assim, o impacto do Metro do Porto na redução do uso do automóvel foi menor do que o esperado, captando essencialmente passageiros dos autocarros e consolidando a rede de transportes públicos existente, em vez de promover uma verdadeira mudança modal (Ibraeva et al., 2021). No entanto, considerando que o Metro do Porto apenas iniciou operações em 2002, o sistema consolidou-se rapidamente como o principal eixo de transporte coletivo da Área Metropolitana do Porto. Atualmente totaliza 70,1 km de extensão - a maior rede de metro ligeiro em Portugal - e encontra-se em plena fase de crescimento com um aumento de 13,4% de validações em 2024 face a 2023 totalizando 89,78 milhões de validações e com a construção das linhas Rosa e Rubi, projetadas para colmatar lacunas de cobertura territorial e aumentar a capacidade global do sistema (Metro do Porto, 2025). Paralelamente, avança o desenvolvimento de duas novas linhas de BRT, cuja viabilidade e potencial benefícios serão analisados nos seguintes capítulos.

Originalmente concebidos como uma reinterpretação dos antigos sistemas de elétricos, os LRT modernos surgiram então para oferecer uma solução intermediária entre os sistemas ferroviários pesados, como os metros e os comboios com os autocarros convencionais (Moraglio & Kopper, 2015). A evolução dos LRT está, por isso, intrinsecamente ligada à evolução dos elétricos urbanos passando a permitir uma maior eficiência operacional e uma melhor integração com as infraestruturas urbanas.

2.4 Sustentabilidade do LRT

A sustentabilidade de sistemas LRT pode ser analisada em três dimensões principais – ambiental, económica e social – de acordo com o conceito de desenvolvimento sustentável.

2.4.1. Sustentabilidade Ambiental

A implementação de sistemas de LRT tem evidenciado um impacto substancial na redução das emissões de gases com efeito de estufa associadas ao transporte urbano. Por serem sistemas eletrificados, apresentam emissões locais nulas de poluentes atmosféricos e de CO₂ durante a operação. As emissões de GEE verificam-se sobretudo nas fases de produção da eletricidade e de construção da infraestrutura, podendo ser significativamente reduzidas caso a eletricidade seja obtida a partir de fontes renováveis. No caso do Metro do Porto, as composições são alimentadas por eletricidade, eliminando as emissões diretas de

GEE em fase operacional. Todavia, persistem emissões indiretas decorrentes do facto de parte da eletricidade consumida ainda provir de fontes não renováveis presentes no *mix* energético nacional. Em 2021, estas emissões indiretas corresponderam a aproximadamente 13.463 toneladas de CO₂e, associadas a um consumo de 57.309.224 kWh de energia elétrica (Metro do Porto, 2022).

Dada a vocação ambientalmente sustentável do metro ligeiro, é fundamental calcular as emissões evitadas ao recorrer a este modo de transporte em detrimento de opções mais poluentes. Para determinar as poupanças em termos de emissões de GEE, deduzem-se as emissões do Metro (originadas pelo consumo de eletricidade) às emissões que teriam sido geradas pelos transportes individuais e coletivos convencionais. Entre 2019 e 2021, o Metro do Porto, registou uma redução das emissões evitadas, explicada, em grande parte, pela pandemia iniciada em março de 2020: o teletrabalho e o aumento do uso de transporte individual o que conduziram à diminuição do número de passageiros e, inevitavelmente, das emissões evitadas. Para atenuar o efeito desta circunstância e considerando a falta de dados entre 2021 e 2025, optou-se por retomar a análise de 2019, em contexto pré-pandémico, onde se verificou que as emissões evitadas alcançaram 60.574,7 toneladas de CO₂e como verificado na equação 1 (Metro do Porto, 2022).

$$E_{avoid} = 60.574,7 \text{ toneladas de CO}_2e \quad (1)$$

Em que, E_{avoid} corresponde às emissões evitadas em 2019, expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Para compreender melhor o impacto destas emissões evitadas, pode-se estabelecer uma equivalência com o número de veículos retirados da circulação. Assumindo uma emissão média de 160 gCO₂/km por automóvel ligeiro (European Environment Agency, 2014) e uma quilometragem média anual por veículo de 15.000 km (International Council on Clean Transportation, 2021), conseguimos calcular quanto é que cada automóvel emite por ano de acordo com a equação 2.

$$e_{car} = \frac{(160 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 15.000 \text{ km})}{1.000.000} = 2,4 \text{ toneladas CO}_2/\text{ano} \quad (2)$$

Em que, e_{car} representa as emissões anuais médias de um automóvel ligeiro, expressas em toneladas de CO₂; 160gCO₂/km é o fator de emissão médio por quilómetro;

15.000 *km* é a quilometragem média anual de um veículo; 1.000.000 é o fator de conversão de gramas para toneladas.

Para compreender quantos veículos o Metro do Porto retirou por ano em 2019 obtemos a equação 3.

$$N_{carros} = \frac{E_{avoid}}{e_{car}} = \frac{60.574,7}{2,4} \approx 25.239 \text{ veículos} \quad (3)$$

Em que, N_{carros} representa o número de automóveis ligeiros equivalentes retirados da circulação; E_{avoid} corresponde às emissões evitadas em 2019, expressas em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e); e_{car} representa as emissões anuais médias de um automóvel ligeiro, expressas em toneladas de CO_2 .

Assim, as 60.574,7 toneladas de CO_2 evitadas pelo Metro do Porto em 2019 equivalem à retirada de cerca de 25.239 automóveis ligeiros das estradas durante um ano. Este significativo contributo para a redução das emissões não só evidencia os benefícios ambientais do Metro do Porto, mas também ilustra, de forma indireta, os ganhos energéticos associados aos sistemas de transporte coletivos modernos. Nesse sentido, a elevada eficiência energética do LRT decorre do baixo atrito eixo-ferro - que resulta de uma menor resistência ao rolamento quando comparado com os pneus de borracha - e à capacidade de transportar um grande número de passageiros com um único motor. Em corredores de alta procura, um LRT pode substituir múltiplos autocarros, consumindo menos energia por passageiro. Além disso, segundo Kebede e Worku (2021) a eficiência energética dos sistemas LRT pode ser otimizada através da implementação de tecnologias avançadas, como sistemas de tração mais eficientes e a incorporação de travagem regenerativa, que permitem a recuperação de energia durante as operações de travagem, reduzindo o consumo energético total.

Em termos de pegada ecológica, a implementação de um sistema de metro ligeiro envolve um impacto ambiental substancial durante a fase de construção. As obras civis como a instalação de trilhos, catenárias, construção de túneis e a edificação de estações são responsáveis por uma elevada emissão de GEE, contribuindo de forma significativa para as emissões globais do sistema como verificado num estudo de Guo et al. (2024) onde realizaram uma análise do ciclo de vida das emissões de GEE em sistemas de metro urbano na China e constataram que a fase de construção representa cerca de 57% das emissões totais

do sistema. Num estudo semelhante, Gulcimen et al. (2021) fizeram uma avaliação abrangente do desempenho ambiental do sistema de metro ligeiro em Kayseri, Turquia, utilizando uma análise do ciclo de vida em conformidade com as normas ISO 14040 e 14044. O estudo teve como objetivo quantificar o impacto ambiental do sistema em nove categorias distintas – entre as quais se destacam o potencial de aquecimento global recorrendo a uma unidade funcional de 1 passageiro-quilómetro para permitir uma análise detalhada do impacto por utilizador. Um dos resultados principais foi a determinação de que o potencial de aquecimento global do sistema é de aproximadamente 24 gCO₂e/pkm, evidenciando um perfil de emissões significativamente inferior em comparação com os métodos tradicionais de transporte urbano, como autocarros ou veículos particulares. Destaca-se que as fases de operação e manutenção foram responsáveis por cerca de 49% das emissões totais, um facto que se deve à utilização de eletricidade proveniente, em grande parte, de fontes fósseis – podendo-se concluir que a integração de fontes de energia renovável na operação dos sistemas LRT é outra estratégia relevante, uma vez que a utilização de eletricidade proveniente de fontes renováveis, como a energia solar ou eólica, pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas aos sistemas de LRT.

O metro ligeiro pode então ser uma importante ferramenta de mitigação climática: ao oferecer um transporte atrativo, induzem a migração de viagens do automóvel para modos coletivos menos poluentes. A introdução de novas linhas de LRT pode levar a uma diminuição substancial no uso de veículos particulares, resultando em menores emissões de CO₂ como evidenciado numa investigação de Boarnet, Wang e Houston (2017) realizada em Los Angeles em que se revelou que agregados familiares residentes a menos de 800 metros de uma estação de LRT reduziram as suas emissões diárias de CO₂ provenientes de veículos pessoais em 27,17% após a inauguração da linha, em comparação com aqueles que residem a distâncias maiores. Por outro lado, Chakrabarti e Giuliano (2016) demonstram que os impactos positivos do LRT não são homogéneos entre todas as cidades, em certos contextos, a introdução do metro ligeiro não reduziu significativamente o uso do automóvel, pois o efeito modal ocorreu na substituição dos passageiros que circulavam em autocarros pela circulação no metro ligeiro, sem grandes ganhos ambientais adicionais.

Ainda no âmbito ambiental, decidi visitar uma parte do corredor da linha azul do Metro do Porto onde o metro ligeiro se comporta mais como um elétrico moderno, nesta zona, o metro circula à superfície numa área densamente povoada. Identificado, em Anexos,

como Figura 1, é possível verificar que o corredor LRT é em via verde, onde o balastro tradicional é substituído por relvado permeável, ladeado por árvores que providenciam sombra contínua. A relva entre os carris permite a infiltração parcial da água da chuva o que reduz o escoamento da água, o relvado também exibe albedo superior e promove a evapotranspiração, enquanto a sombra projetada pelas árvores reduz a temperatura, isto é uma excelente estratégia de arrefecimento urbano. A vegetação arbórea e o relvado conseguem capturar o CO₂ atmosférico e absorvem material particulado fino (PM_{2.5}), é este tipo de infraestrutura que está alinhado com as metas de desenvolvimento de uma cidade mais verde (Major et al., 2023).

2.4.2. Sustentabilidade Económica

Grande parte da literatura dedicada à comparação entre diferentes sistemas de transporte público tende a centrar-se predominantemente nos custos de capital (CAPEX) (Levine et al., 2018 & Tirachini et al., 2010). No entanto, esta abordagem revela-se, em muitos casos, metodologicamente insuficiente e potencialmente enganadora. O foco exclusivo no CAPEX ignora o facto de que sistemas com custos de capital mais elevados podem apresentar, ao longo da sua vida útil, custos operacionais (OPEX) significativamente mais baixos, o que, em projetos com horizontes temporais de 30 a 40 anos, pode inverter completamente a lógica do investimento mais “económico”. Como tal, a comparação rigorosa e justa entre dois sistemas de transporte deve, obrigatoriamente, assentar numa análise do custo total de propriedade que envolva o CAPEX e o OPEX num determinado horizonte de anos.

Em geral, os sistemas de LRT requerem um CAPEX mais elevado devido à necessidade de maior infraestrutura comparativamente a um sistema BRT. Esse elevado custo de investimento inicial pode ser verificado na Tabela 1 e Tabela 2, em Anexos.

De acordo com a Tabela 1 e a Tabela 2, conseguimos observar que o custo médio por quilómetro de projetos de LRT é de cerca de 25 milhões de dólares em países em desenvolvimento e de 37 milhões de dólares em países desenvolvidos. Esta discrepância resulta, em grande medida, de uma maior prevalência de troços subterrâneos no contexto dos países desenvolvidos (além de um custo mais elevado devido a mão de obra), solução que encarece substancialmente cada quilómetro construído. No âmbito do presente estudo procede-se, todavia, à comparação dos custos de infraestrutura entre soluções LRT e BRT

para uma linha de 4 quilómetros integralmente á superfície. Para evitar enviesamentos, excluem-se segmentos em túnel (que são fortemente intensivos a nível de capital). A Tabela 3, sintetiza os custos por quilómetro de quatro casos de referência constituídos unicamente por troços de LRT de superfície em países desenvolvidos, semelhantes ao nosso corredor de comparação que vamos analisar na Discussão.

Tabela 3 - Custo por quilómetro de projetos LRT sem túneis ou viadutos

Cidade/Linha (ano de entrada em serviço)	Extensão (km)	Custo total (M € correntes)	Custo nominal (M €/km)	Referências
Besançon – Linha única (2014)	14,5	254	17,5	Kwolek (2024)
Paris-Île-de-France – Tram T9 (2021)	10,3	404	39,2	Urban Transport Magazine (2021)
Nice – Tram T3 (2019, 100 % superfície)	3,8	57	15,0	Urban Transport Magazine (2019)
Avignon – Linha T1 (2019)	5,2	135	26,0	Tramways & Urban Transit (2019)
Média			24,425 M€/km	

Fonte: Elaboração própria.

Não obstante CAPEX de cerca de 24M€, estes sistemas têm uma longa vida útil e uma elevada capacidade de transporte, o que pode resultar numa melhor relação custo-benefício a longo prazo, sobretudo em corredores com forte procura (Souza Júnior, 2014).

Já em relação aos OPEX do LRT, estes resultam de múltiplos fatores, como os gastos com energia a manutenção tanto dos veículos como da via e as despesas administrativas. Segundo Levine et al. (2018), esses sistemas apresentam uma maior previsibilidade nos custos operacionais quando comparados ao BRT. A vantagem do LRT reside na sua maior capacidade de transporte, permitindo a diluição dos custos por passageiro-quilómetro e, no caso da cidade do Porto, beneficiando de economias de escala. Adicionalmente, a eletrificação do sistema reduz os custos energéticos, devido à maior eficiência energética e à possibilidade de travagem regenerativa, sendo o benefício económico particularmente favorável em contextos com elevada participação de fontes renováveis (International Energy Agency, 2019), como é o caso de Portugal (Redes Energéticas Nacionais, 2025).

A manutenção constitui um dos principais elementos do OPEX associados aos sistemas de LRT. Embora os veículos ferroviários apresentem uma vida útil consideravelmente longa, as intervenções exigidas pela infraestrutura, tais como a

manutenção periódica dos carris e a inspeção dos sistemas elétricos, podem implicar custos significativos (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2009). No entanto, estas intervenções tendem a realizar-se em ciclos relativamente prolongados, permitindo uma distribuição mais eficiente dos investimentos ao longo do tempo. Acresce que os veículos de LRT possuem, habitualmente, uma vida útil estimada entre 30 a 40 anos (Souza Júnior, 2014). Neste contexto, Levine et al. (2018) salientam que, apesar dos elevados custos iniciais envolvidos na implementação do LRT, este sistema poderá revelar-se economicamente vantajoso a longo prazo, sobretudo em áreas urbanas densamente povoadas, onde a forte procura contribui para maximizar as receitas provenientes da tarifa bilhética.

Dessa forma, a viabilidade económica do LRT não depende apenas do OPEX e do CAPEX, mas também da capacidade de atrair utilizadores e gerar receitas sustentáveis para o sistema e reduzir os custos das externalidades como o congestionamento, acidentes e a poluição para a sociedade. Um critério de sustentabilidade económica é o retorno socioeconómico do investimento – frequentemente avaliado via análise custo-benefício. Nem sempre o modal de menor custo inicial é o de melhor retorno a longo prazo; se um LRT atrair mais passageiros e induzir mais benefícios (como diminuição do congestionamento, revitalização urbana, redução de carros, ganhos de tempo), pode acabar por justificar um investimento maior. A sustentabilidade económica de um sistema LRT deve então equilibrar os custos de implementação e operação, mas também os benefícios diretos e indiretos gerados.

Outro aspeto crítico destacado é a relação entre os investimentos em LRT e o desenvolvimento urbano sustentável. Boray et al. (2024) sublinham que um dos principais benefícios económicos do metro ligeiro é mesmo a sua capacidade de aumentar o valor das propriedades nas proximidades das estações de trânsito e impulsionar o crescimento económico local em torno das estações, promovendo a densificação urbana e fomentando novos polos comerciais e habitacionais, estes efeitos multiplicadores podem ampliar a viabilidade económica do LRT reduzindo a necessidade de incentivos governamentais a longo prazo e tornando o sistema mais autossustentável. Isto é particularmente evidente em cidades como Manchester, onde a introdução do sistema de metro ligeiro, o *Metrolink*, foi associada a um aumento acentuado da atividade económica local, como evidenciado pelo aumento da clientela e pelo subsequente crescimento das empresas ao longo das rotas de

trânsito (Senior, 2009). De forma semelhante, Dziauddin (2021) demonstrou que as propriedades residenciais situadas nas proximidades das estações de LRT tendem a registar uma valorização significativa, esse estudo, realizado em Kuala Lumpur, verificou-se que os imóveis localizados a menos de 1000 metros das estações de metro ligeiro apresentaram um aumento aproximado de 12,3% no seu valor, sendo que este aumento foi ligeiramente inferior para as propriedades situadas a distâncias maiores.

Para avaliar adequadamente os benefícios económicos do LRT, é então essencial considerar as externalidades associadas a cada modo de transporte. As externalidades referem-se a impactos não contabilizados em decisões económicas ou sociais, que afetam terceiros sem uma compensação ou consideração adequada (Boudreaux & Meiners, 2019). No contexto dos transportes, os custos externos representam os impactos negativos que não são suportados diretamente pelos utilizadores, mas que afetam a sociedade como um todo. Por exemplo, o uso de automóveis movidos a combustíveis fósseis provoca emissões de NO_x que por sua vez provocam danos à saúde pública, como doenças respiratórias, sendo um claro exemplo de custo externo, já que o condutor do veículo não leva em conta o impacto da sua escolha no bem-estar da população (Ritchie & Rosado, 2025). Assim, ao comparar os diferentes modos de transporte, é importante reconhecer que todas as formas de transporte têm externalidades associadas. Externalidades essas que incluem não só acidentes, mas também a poluição do ar, mudanças climáticas, poluição sonora, congestionamento, emissões “well-to-tank” (relacionadas à produção, processamento e fornecimento de combustíveis), danos ao habitat e perdas de tempo devido ao congestionamento que acabam por afetar a produtividade. Esses custos são frequentemente ignorados no processo de tomada de decisão do utilizador de transporte.

Estas externalidades representam então custos significativos para a economia urbana. No caso do Metro do Porto, as externalidades positivas, ou seja, os benefícios sociais e ambientais, em 2019, foram de aproximadamente 217 milhões de euros, considerando apenas a redução da emissão de CO_2 para a atmosfera, os ganhos de tempo dos utilizadores e a redução da pressão sobre o estacionamento (Metro do Porto, 2020). Já em contexto europeu, as externalidades causadas devido à congestão rodoviária estimam-se em €271 mil milhões anuais (European Commission, 2020). O estudo de Fageda (2021) demonstra que, nas cidades europeias de média dimensão que investiram em sistemas LRT, ocorreu em média uma redução de 7% na congestão rodoviária, 1% no tempo de deslocação e 3% na poluição

atmosférica quando comparadas com outras cidades europeias que não efetuaram investimentos semelhantes. Estes resultados reforçam a relevância do LRT como solução de mobilidade sustentável, ao mitigar custos externos inerentes ao tráfego automóvel.

Para ilustrar a relevância destas externalidades no contexto europeu, a Tabela 4, em Anexos, apresenta os custos externos totais por modo de transporte e o respetivo peso no PIB de cada país da UE27 e do Reino Unido. Observa-se que o transporte rodoviário é responsável pela maior fatia dos custos externos na maioria dos países representando um custo total das externalidades em 820.4 mil milhões de euros em 2016, em comparação, o transporte ferroviário regista valores substancialmente inferiores de 17.87 mil milhões de euros. Esta disparidade reforça a ideia de que investir em soluções ferroviárias, nomeadamente em sistemas de metro ligeiro, pode atenuar significativamente os custos dessas externalidades.

Importa ainda salientar que, de acordo com a Tabela 4, Portugal apresenta a maior percentagem do PIB (Produto Interno Bruto) associada aos custos externos do transporte, o que pode estar relacionado com o facto de o país ter vindo a registar um desinvestimento no setor ferroviário, a média anual de investimento na ferrovia entre 1995-2016 situou-se em apenas 0,13% do PIB, valor claramente inferior à média europeia de 0,23% (Schroten et al., 2019).

2.4.3. Sustentabilidade Social

A implementação do metro ligeiro tem se mostrado um importante catalisador para o desenvolvimento urbano. A instalação de estações de LRT frequentemente estimulam a valorização imobiliária nas áreas circundantes e promove a regeneração de regiões urbanas degradadas, o que contribui para uma transformação positiva do ambiente urbano (Dziauddin, 2019). Essa integração facilita o acesso dos cidadãos a polos comerciais e industriais e também a serviços essenciais o que promove a inclusão social, ampliando as opções de deslocamento para diversos segmentos da população. Dessa forma, o LRT não se configura apenas como uma solução de transporte, mas também como um elemento estratégico para o desenvolvimento sustentável das cidades.

A implementação de um sistema LRT requer, contudo, um planeamento urbano meticuloso. A complexidade dos projetos, que frequentemente envolve obras subterrâneas

ou estruturas elevadas, exige uma coordenação estreita entre as autoridades municipais, agências de transporte e a comunidade. Esse processo colaborativo é fundamental para assegurar que o LRT se integre ao tecido urbano, promovendo não apenas a eficiência do transporte, mas também a regeneração das áreas urbanas degradadas e a valorização imobiliária em torno das estações. Estudos de Knowles e Ferbrache (2016) ressaltam que a integração do LRT com estratégias de ordenamento territorial e políticas de incentivo à mobilidade sustentável pode resultar em benefícios significativos para a coesão social e o desenvolvimento económico das cidades. A proximidade a estações de LRT pode incentivar deslocações a pé ou de bicicleta, promovendo a prática de exercício físico ao ar livre e um estilo de vida mais saudável (Ravensbergen et al., 2023). Adicionalmente, os sistemas de metro ligeiro, ao serem movidos a energia elétrica, emitem significativamente menos gases com efeito de estufa por passageiro-quilómetro em comparação com outros modos de transporte movidos a combustíveis fósseis, o que contribui para uma melhor coesão social dentro das localidades (Procter et al., 2017).

2.5 Conceito de Bus Rapid Transit

O BRT constitui uma alternativa no campo dos sistemas de transporte público, combinando a flexibilidade inerente aos autocarros com elementos de desempenho típicos dos sistemas ferroviários. Caracteriza-se por ser um sistema de trânsito rápido com base em autocarros que pode atingir uma elevada capacidade e velocidade a um custo relativamente baixo, combinando faixas de rodagem segregadas, cobrança de tarifas fora de bordo, embarque nivelado, prioridade nos cruzamentos e outros elementos de qualidade de serviço como a tecnologia da informação e uma marca forte (Jagiello, 2017). Estes veículos são frequentemente equipados com tecnologias sustentáveis, incluindo motores híbridos, elétricos ou movidos a hidrogénio, contribuindo para a redução das emissões de GEE. No entanto, a implementação do BRT não está isenta de desafios. A coordenação entre diferentes entidades envolvidas no planeamento e operação pode ser complexa, dificultando decisões sobre medidas de prioridade, como faixas exclusivas ou interseções o que acaba por comprometer a eficácia do sistema (Allansson et al., 2023). Além disso, em certos contextos, o desempenho operacional do BRT tem-se revelado abaixo do esperado, com limitações em termos de capacidade, frequência e fiabilidade, como observado no sistema de Hanói (Nguyen et al., 2020). A valorização imobiliária associada ao BRT também é desigual, podendo gerar efeitos negativos em zonas residenciais afetadas por ruído ou elevada

intensidade de tráfego (Acton et al., 2022). Por fim, sistemas mais antigos na América Latina têm sofrido com superlotação, evasão de tarifas e degradação da infraestrutura, o que compromete a percepção da qualidade e pode levar à perda de utilizadores (Hidalgo et al., 2024).

2.6 Evolução e Implementação do BRT

As bases conceptuais do BRT podem ser encontradas em testes piloto em meados do século XX com faixas prioritárias para autocarros em Chicago e Washington, D.C., embora estes primeiros esforços não tivessem a conceção integrada que define o BRT moderno (Levinson et al., 2002). O grande avanço veio em 1974 com a Rede Integrada de Transporte de Curitiba, que introduziu faixas exclusivas, estações em forma de tubo para embarque em nível e uma estrutura tarifária facilitada que incentivou o desenvolvimento urbano de alta densidade ao longo dos corredores de trânsito (Cervero, 2013). Este modelo demonstrou que os autocarros, muitas vezes considerados como um meio de transporte de “segunda classe”, podiam atingir uma eficiência semelhante à dos caminhos-de-ferro a uma fração do custo. Na década de 2000, o TransMilenio de Bogotá aperfeiçoou ainda mais o conceito, incorporando faixas de ultrapassagem e serviços expressos para movimentar mais de 2 milhões de passageiros diariamente (Hidalgo & Gutiérrez, 2013). No entanto, a rápida adoção global do BRT tem sido desigual. Na América Latina e na Ásia, o BRT floresceu em cidades como a Cidade do México, Jacarta e Guangzhou, onde uma forte liderança política e um planeamento centralizado permitiram investimentos em infraestruturas de grande escala, em contrapartida, as cidades europeias e norte-americanas, limitadas pelas redes ferroviárias existentes e pela resistência política à reafecção do espaço rodoviário, têm sido mais lentas a adotar sistemas BRT.

O BRT na Europa emergiu como uma solução intermediária entre o autocarro convencional e o metro ligeiro. Na década de 1990, embora inúmeras cidades europeias se encontrassem a requalificar antigos corredores de eléctrico – convertendo-os para acolher veículos de nova geração e, assim, capitalizar infraestruturas existentes – nem todos esses corredores urbanos justificavam os elevados custos associados a essa implementação. Nesses contextos, o BRT surgiu para preencher a lacuna, proporcionando uma capacidade e desempenho médios, aliados a menores custos e maior flexibilidade (Hidalgo & Gutiérrez, 2013). Cidades pioneiras na Europa, como Rouen (França), que lançou em 2001 um sistema

BRT com corredores segregados, e Nantes, que inaugurou em 2006 a Linha 4 “BusWay” como alternativa ao LRT, demonstraram que, com um projeto adequado, o BRT pode combinar a rapidez e a fiabilidade do transporte ferroviário com a versatilidade e a economia dos autocarros (Serrano & Lambas, 2010). Desde então, o número de sistemas BRT tem crescido de forma acelerada; em julho de 2014, existiam aproximadamente 180 cidades com corredores BRT no mundo, das quais pelo menos 25 estavam na Europa (Hidalgo & Muñoz, 2015). Atualmente, a Europa conta com cerca de 65 corredores em 47 cidades, abrangendo um total de 950 quilómetros e transportando cerca de 3,17 milhões de passageiros por dia, o que consolida o BRT como uma componente essencial no conjunto de soluções de mobilidade urbana (BRT+ Centre of Excellence & WRI Brasil Ross Center for Sustainable Cities, 2023).

2.7 Sustentabilidade do BRT

Em contraste com os sistemas LRT, que operam exclusivamente com propulsão elétrica, os sistemas BRT caracterizam-se por uma maior diversidade tecnológica, podendo ser alimentados por motores a diesel, tecnologias híbridas, eletricidade (baterias) ou mesmo hidrogénio. Assim, nesta dissertação, a comparação entre os sistemas BRT e os LRT incidirá prioritariamente sobre as soluções BRT baseadas em baterias elétricas e hidrogénio, mantendo, contudo, uma referência aos sistemas alimentados por diesel e híbridos. Esta delimitação metodológica justifica-se pela predominância, no contexto português, dos projetos de BRT que optam pela eletrificação através de baterias, bem como pela inovação representada pelo projeto do Metrobus do Porto, que integra a tecnologia do hidrogénio verde.

2.7.1. Sustentabilidade Ambiental

É importante destacar que a sustentabilidade ambiental dos sistemas BRT está intrinsecamente ligada à tecnologia veicular empregada. Historicamente, diversos sistemas BRT implementaram veículos a diesel convencionais, o que pode limitar os benefícios ambientais quando comparados com sistemas eletrificados, como os LRT. Estudos de Avaliação do ciclo de vida (ACV) demonstram que um sistema BRT operado com frota a diesel pode resultar em emissões de carbono durante o seu ciclo de vida até duas vezes superiores às de um sistema LRT, sendo que os sistemas híbridos apresentam emissões aproximadamente 30% superiores ao longo da sua vida útil (Alstom & Carbone 4, 2022).

A rápida evolução tecnológica tem impulsionado a incorporação, nos sistemas BRT, de veículos com tecnologias de propulsão menos poluentes, nomeadamente motores elétricos e a hidrogénio. Esta transformação reduz significativamente a pegada de carbono e os níveis de poluição local. Vários estudos de ACV demonstram que a substituição de autocarros a diesel por veículos elétricos em linhas BRT resulta em reduções significativas nas emissões de CO₂. Por exemplo, a análise de dez linhas BRT em quatro cidades espanholas conduzida por García et al. (2022) revelou que a implementação de autocarros elétricos pode reduzir em cerca de 60% as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida, em comparação com uma frota a diesel de capacidades equivalentes. Os autocarros híbridos apresentam também benefícios ambientais, tendo sido registada uma diminuição de aproximadamente 40% nas emissões de CO₂ durante o ciclo de vida, embora este desempenho seja inferior ao observado nos autocarros totalmente elétricos.

Os autocarros elétricos demonstram uma eficiência energética superior “well-to-wheel” - expressão que abrange todas as etapas do ciclo energético, desde a extração da energia até à tração das rodas - face aos autocarros com motor de combustão interna. Um estudo de Kuyumcu et al., (2024) sobre autocarros de 18 metros em serviço urbano indicam reduções de 65-70% no consumo de energia primária e na pegada de carbono, quando comparados com diesel convencionais, mantendo a capacidade de transporte. Avaliações de frotas municipais em vários contextos europeus confirmam poupanças médias de 68% nas emissões “well-to-wheel” e apontam a eletrificação dos corredores de alta frequência como uma das estratégias mais custo-eficazes de descarbonização do transporte coletivo (Kuyumcu et al., 2024).

A viabilidade operacional dos sistemas BRT elétricos assenta, em grande medida, no facto de conseguirem recarregar as baterias rapidamente para não impactar os tempos de serviço. No programa ÉcoCités, que em 2019 distinguiu o e-Busway de Nantes como projeto piloto, demonstrou que carregamentos de 600kW via pantógrafo permitem reabastecer as baterias em menos de dois minutos (Nantes Métropole, 2019). A integração dos ciclos de carregamento na operação diária é crítica para evitar novos picos de procura na rede elétrica. Kim et al. (2021) mostram que estratégias de “carregamento de oportunidade” – pantógrafos rápidos nos terminais – combinadas com carregamento noturno em horas de vazio podem suavizar a curva de carga, reduzir os custos de energia e, simultaneamente, oferecer serviços de armazenamento distribuído para apoiar a estabilidade da rede em cenários de elevada

penetração de renováveis. Assim, a eletrificação dos corredores BRT não só reduz emissões e consumo energético, como também pode contribuir para a flexibilidade do sistema elétrico, reforçando a sustentabilidade global da modalidade urbana.

A eletrificação dos autocarros resulta em benefícios notáveis, sobretudo na redução do ruído e na melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas. Os motores elétricos operam de forma quase silenciosa, especialmente a baixas velocidades e durante paragens, eliminando o ruído característico dos motores diesel, que se manifesta principalmente em situações de aceleração e ventilação. Medições efetuadas num projeto piloto de BRT elétrico indicaram níveis sonoros de aproximadamente 70 dB quando o veículo está parado e cerca de 75 dB a 50 km/h, valores estes inferiores aos 80–85 dB normalmente registados em autocarros convencionais sob condições semelhantes. Esta redução do ruído contribui para a diminuição da poluição sonora ao longo dos corredores de transporte, promovendo um ambiente urbano mais tranquilo. Este benefício é particularmente relevante em áreas residenciais e zonas pedonais atravessadas por linhas BRT, onde a operação silenciosa dos veículos elétricos melhora significativamente o conforto dos moradores (European Commission, n.d.).

No que diz respeito aos desafios ambientais, um dos principais pontos de atenção incide sobre o impacto ambiental associado à produção e ao fim de vida útil das baterias de lítio empregues nos autocarros elétricos. A extração de lítio, cobalto e outros materiais necessários ao seu fabrico pode provocar degradação ambiental e desencadear conflitos socio ecológicos nas zonas de mineração. Embora estes impactos não se verifiquem diretamente nas áreas urbanas onde operam os sistemas BRT, constituem componentes essenciais na ACV dos veículos. A produção das baterias e da infraestrutura de carregamento foi considerada na ACV realizada por Lozanovski et al. (2018), a qual enfatiza a necessidade de uma gestão criteriosa da origem dos materiais e da reciclagem, de modo a minimizar os impactos ambientais. Adicionalmente, políticas europeias, como a “*EU Battery Regulation*” têm vindo a exigir o aumento do conteúdo reciclado e a implementação de processos de reciclagem mais eficientes, contribuindo para atenuar, a longo prazo, estas externalidades ambientais (European Parliament & Council of the European Union, 2023). No que diz respeito ao hidrogénio, destaca-se uma preocupação relativa ao desperdício energético inerente ao seu processo de produção. Em situações em que a eletricidade empregue na eletrólise não seja proveniente de fontes renováveis, ou se ocorrerem fugas significativas de

hidrogénio – sendo este um gás de efeito estufa indireto – os benefícios ambientais potencialmente associados à sua utilização podem ser substancialmente comprometidos (Lozanovski et al., 2018).

No contexto dos autocarros a hidrogénio, a análise “tank-to-wheel” evidencia uma eficiência energética intrinsecamente inferior à dos autocarros elétricos a bateria (BEB). As perdas acumuladas nos processos de eletrólise, compressão a 350-700 bar e a conversão eletroquímica na célula de combustível fazem com que a eficiência global do hidrogénio se situe tipicamente entre 30% e 40%, ao contrário dos BEB que podem superar os 70% no mesmo indicador (Estrada Poggio et al., 2023). Contudo, quando o hidrogénio é obtido a partir de excedentes de geração renovável, o H₂ atua como mecanismo de flexibilidade da rede, convertendo a eletricidade de baixo custo em combustível zero-carbono e mitigando, assim, o impacto da menor eficiência intrínseca. Um exemplo prático desta abordagem é o sistema Fébus, em Pau (França). O corredor BRT opera veículos articulados com uma autonomia operacional de 240 – 340 km. A frota é abastecida numa estação própria que integra eletrólise alimentada por energia fotovoltaica e apresenta uma capacidade de produção diária entre 174 e 268kg de H₂ - suficiente para cobrir o serviço regular sem emissões locais e aproveitando os recursos renováveis captados pelo próprio município. Esta configuração fecha o ciclo local de energia: a eletricidade renovável é convertida em hidrogénio, armazenada e reconvertida a bordo em energia elétrica para propulsão (Sustainable Bus, 2019 & ENGIE Solutions, 2020).

No entanto, o desempenho ambiental está intrinsecamente condicionado pela origem do hidrogénio. Quando o hidrogénio é produzido por meio de eletrólise alimentada por energia renovável – denominado hidrogénio verde – as reduções no potencial de aquecimento global podem atingir cerca de 85% em comparação com autocarros a diesel (Lozanovski et al., 2018). Este resultado deve-se, fundamentalmente, às emissões quase inexistentes durante a operação e ao impacto ambiental reduzido associado à produção de combustível, desde que este seja derivado de eletricidade limpa. Em contrapartida, se o hidrogénio for obtido a partir de fontes fósseis convencionais – por exemplo, através da reforma do metano sem captura de carbono, processo que resulta no denominado “hidrogénio cinzento” –, a pegada de carbono poderá ser equiparável ou até mesmo superior àquela dos autocarros a diesel.

A qualidade do ar urbano também regista melhorias substanciais com a introdução de frotas de veículos de zero emissões. Tradicionalmente, os autocarros a diesel têm sido uma fonte significativa de emissões de NO_x, material particulado (PM_{2.5}) e hidrocarbonetos não queimados. A substituição destes veículos por autocarros elétricos ou a hidrogénio elimina, praticamente, as emissões provenientes do tubo de escape destes poluentes. No âmbito do projeto LIFE BeeBus, foram registadas reduções totais da ordem dos ~359 kg de NO_x, 6,5 kg de PM e 257 kg de CO₂ durante o período de demonstração, evidenciando o impacto direto da cessação da queima de combustíveis fósseis (European Commission, n.d.). Importa referir que, apesar de persistirem determinadas emissões designadamente as micropartículas resultantes do desgaste de travões e pneus, as reduções globais de emissões alcançadas abrangem os principais contaminantes atmosféricos urbanos. Tal constatação é corroborada pelas metas estabelecidas no âmbito do projeto eBRT2030, que prevê uma diminuição dos níveis de NO_x nas paragens em cerca de 50% e uma redução de até 90% ao longo do ciclo de vida completo dos sistemas, mediante a transição para tração elétrica (Rupprecht Consult GmbH, n.d.).

Ainda no âmbito ambiental, decidi visitar uma parte do corredor BRT da Linha Boavista-Império, identificado em Anexos como Figura 2, onde se verifica um corredor em plataforma rígida de asfalto, desprovido de arborização de alinhamento ou coberto vegetal junto ao canal de tráfego, além de ser impermeável o que pode aumentar o escoamento em tempo de cheias, o asfalto tem ainda um albedo baixo e uma grande capacidade térmica, o que conduz à acumulação de calor durante o dia e à sua libertação noturna exacerbando o efeito de ilha de calor. As temperaturas superficiais podem exceder em 10-15°C as de áreas vegetadas adjacentes (Amani, 2025), este projeto não é o tipo de infraestrutura que está alinhado com as metas de desenvolvimento de uma cidade mais verde.

2.7.2. Sustentabilidade Económica

Além dos ganhos ambientais, torna-se imperativo avaliar a viabilidade económica a longo prazo dos sistemas BRT que adotam tecnologias limpas, bem como a sua competitividade face a outras alternativas de transporte. A sustentabilidade económica destes sistemas implica não só a realização de análises custo-benefício a nível da sociedade – que integram as externalidades associadas, tais como os impactos ambientais e sociais – como

também a avaliação financeira direta para operadores e autoridades, considerando os custos de investimento, operação e manutenção.

Estudos conduzidos na União Europeia indicam um cenário promissor. Embora os custos iniciais dos sistemas BRT de tecnologia limpa possam ser elevados, as análises de ciclo de vida e os cenários de maturação tecnológica projetam que, num horizonte de 10 a 15 anos, os sistemas BRT movimentados a hidrogénio verde poderão atingir uma viabilidade económica que converge ou até supera a das alternativas convencionais, especialmente quando se contabilizam as externalidades decorrentes da sua implementação (Lozanovski et al., 2018 & Ciancetta et al., 2023 & Coppitters et al., 2022).

Os sistemas BRT já eram reconhecidos pela capacidade de transporte e pela redução dos tempos de viagem, apresentando custos de capital substancialmente inferiores aos modos de transporte sobre carris. A integração de frotas elétricas ou a hidrogénio potencializa os benefícios ambientais, que contabilizando as suas externalidades pode significar poupanças operacionais. Segundo a International Association of Public Transport (UITP) (n.d.), a implementação de sistemas BRT, em comparação a sistemas LRT, pode implicar um investimento entre 4 a 20 vezes inferior por quilómetro, dependendo da extensão das obras de infraestrutura necessárias, permitindo assim a cobertura de múltiplos corredores com o mesmo orçamento. Esta vantagem de custo foi demonstrada na cidade de Nantes, onde a linha de BRT denominada “Busway” (Linha 4), construída com especificações comparáveis às do metro ligeiro, em que apresentou um custo significativamente inferior ao de uma nova linha de LRT, mesmo atingindo volumes de tráfego comparáveis – aproximadamente 40 mil passageiros por dia em 2017 (Nantes Métropole, 2019; UITP, n.d.).

Com a transição para veículos elétricos, prevê-se uma redução significativa do TCO a longo prazo, atribuída à maior eficiência energética e à redução dos gastos com combustível. O TCO refere-se à soma de todos os custos associados à aquisição, operação, manutenção e, eventualmente, ao fim de vida útil do veículo, permitindo uma avaliação abrangente do investimento ao longo do tempo. Um estudo realizado em Offenburg, na Alemanha, projeta que, até 2030, a transição para autocarros elétricos poderá reduzir o TCO por quilómetro em aproximadamente 23% face aos sistemas a diesel, considerando inclusive os custos associados às infraestruturas de carregamento (Kim et al., 2021). Já para os autocarros a hidrogénio, apesar da esperada redução nos custos, em 2030, ainda apresentam

um TCO 15,4% superior ao sistema com autocarros diesel. Contudo, assumindo um aumento de escala nas infraestruturas de abastecimento de hidrogénio na Europa, e num cenário com redução significativa nos custos do combustível para cerca de 5 €/kg, o TCO dos autocarros a hidrogénio pode tornar-se ligeiramente inferior ao dos autocarros diesel até 2030, ou seja, podem tornar-se economicamente competitivos em cidades de pequeno e médio tamanho, mesmo com rotas limitadas, desde que haja a redução significativa nos custos do combustível (Kim et al., 2021).

Em termos de análise de benefício, os sistemas BRT apresentam ganhos significativos, incluindo a redução dos tempos de deslocação (que se traduz em aumento da produtividade económica), a diminuição dos congestionamentos (com consequente redução de horas perdidas no tráfego) e o estímulo à economia local. Embora estes benefícios possam variar consoante o contexto, há exemplos ilustrativos: por exemplo, Istambul, Turquia, demonstrou que a sua linha BRT “Metrobús” permitiu economizar uma média de 28 dias de deslocação por ano, por utilizador, em comparação com outros modos de transporte e Joanesburgo estimou ganhos de 73 milhões de horas para a economia em 20 anos de operação do BRT (King, 2013).

No que diz respeito à manutenção, os autocarros elétricos beneficiam de uma arquitetura simplificada – pela ausência de componentes essenciais de veículos com motor de combustão (tais como motor, caixa de mudanças, entre outros) – o que resulta numa teórica redução dos custos da manutenção. O projeto eBRT2030 prevê que, com a transição para frotas elétricas, os custos de manutenção possam reduzir até 20% (Rupprecht Consult GmbH, n.d.). Por outro lado, a transição para tecnologias de propulsão elétrica e a hidrogénio acarreta a emergência de novos custos operacionais. Por exemplo, a substituição das baterias, necessária aproximadamente a cada 7–10 anos, representa um fator financeiro relevante – podendo corresponder a cerca de 20–30% do custo de aquisição do veículo – e deve ser devidamente provisionada. Muitos operadores já mitigam este impacto mediante contratos de manutenção com os fornecedores, como o leasing de baterias, o que permite garantir desempenho e substituição a uma mensalidade fixa, diluindo assim o efeito das despesas operacionais (OPEX), que incluem despesas com energia, manutenção e serviços administrativos. No caso dos autocarros a hidrogénio, os custos de manutenção atuais tendem a ser superiores aos dos autocarros elétricos a bateria, dado que a sua manutenção envolve a gestão de equipamentos mais complexos – como células de combustível, tanques

de alta pressão e compressores – e, adicionalmente, há uma menor experiência acumulada na operação deste tipo de tecnologia (Kim et al., 2021).

Quanto à viabilidade a longo prazo, a análise de Lozanovski et al. (2018) demonstrou que, ao se contabilizarem os benefícios ambientais – ou seja, ao internalizar custos associados à saúde e à mitigação das alterações climáticas – um autocarro a hidrogénio poderia tornar-se tão "economicamente sustentável" quanto um autocarro a diesel já a partir de 2030. Portanto, do ponto de vista do planeamento financeiro de longo prazo, faz sentido que os municípios iniciem já a transição para frotas limpas, aproveitando os apoios disponíveis, para colher os benefícios económicos futuros e internalizar externalidades positivas.

Um sistema BRT, semelhantemente ao LRT, pode também produzir impactos económicos locais tanto de forma direta quanto indireta. De forma direta, a construção e a operação das linhas BRT geram emprego e atividade económica. Por exemplo, a implementação do BRT Fébus em Pau exigiu a formação de 100 funcionários – 50 motoristas e 50 técnicos de manutenção – para gerir a nova tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento de capital humano especializado e a criação de empregos qualificados no setor da mobilidade sustentável (Sustainable Bus, 2019). Em Amiens, o lançamento da rede elétrica Nemo foi acompanhado pela formação de 300 colaboradores para a operação e recarga dos veículos, demonstrando como a transição energética no transporte pode gerar oportunidades de trabalho e estimular a aquisição de novas competências (Randall, 2019). De forma indireta, um BRT bem-sucedido pode aumentar a atratividade das zonas urbanas ao melhorar o acesso a oportunidades e serviços, o que pode levar a valorizações imobiliárias positivas ao longo das suas rotas (Acton et al., 2022), este efeito de rede – conectar bairros antes mal servidos – pode reduzir disparidades regionais, ampliando mercados de trabalho e a coesão económica.

Por fim, do ponto de vista dos utilizadores, os ganhos em tempo e fiabilidade proporcionados pelo sistema BRT refletem-se numa melhoria significativa da produtividade individual e da qualidade de vida. Com o tempo de deslocação reduzido, os passageiros dispõem de mais tempo para atividades produtivas ou de lazer, contribuindo para a diminuição de um custo oculto frequentemente negligenciado nas análises urbanas. Assim, o potencial económico de um sistema BRT sustentável está em consonância com a visão de cidades europeias competitivas, inovadoras e com elevada qualidade de vida.

2.7.3. Sustentabilidade Social

A literatura sobre sustentabilidade social do BRT realça a importância da distribuição equitativa de benefícios, principalmente para comunidades de baixos rendimentos (Venter et al., 2018). Em cidades como Bogotá (Colômbia) e Delhi (Índia), observou-se que os corredores BRT reduzem os tempos de viagem e melhoram a acessibilidade aos serviços urbanos, resultando num impacto positivo na inclusão social. Porém, a capacidade de certas populações beneficiarem efetivamente destes ganhos depende da localização dos corredores e das condições tarifárias (Venter et al., 2018). Quando o planeamento não cobre áreas periféricas os grupos mais desfavorecidos podem não usufruir plenamente do sistema.

Do ponto de vista da acessibilidade económica, Aderibigbe & Olajide (2023) apontam que as políticas tarifárias desempenham um papel decisivo na inclusão de passageiros, embora muitos projetos BRT ofereçam melhorias substanciais em conforto e eficiência, se a tarifa se revelar excessiva face ao rendimento médio das populações mais pobres, a adesão tende a ser limitada. Por outro lado, estratégias como a tarifa plana - um esquema de preço único por viagem, independentemente da distância ou dos transbordos ou a integração gratuita entre as linhas de autocarro e os corredores principais do BRT reduzem o esforço financeiro dos agregados de baixo rendimento localizados na periferia, aumentando a equidade de acesso ao BRT (Venter et al., 2018).

Quanto à inclusão universal, os sistemas BRT modernos costumam adotar normas de acessibilidade, como veículos de piso rebaixado e rampas nas estações (Aderibigbe & Olajide, 2023). Tais intervenções permitem acomodar passageiros com mobilidade reduzida, contribuindo para a coesão social. Não obstante, a qualidade efetiva da operação – como frequência de autocarros, lotação e fiabilidade horária – afeta diretamente a experiência do utilizador. Em Lagos (Nigéria), por exemplo, identificaram-se lacunas de serviço que limitam o aumento de procura, ainda que a perceção global dos passageiros sobre a equidade seja “moderadamente positiva” (Aderibigbe & Olajide, 2023).

Os impactos no emprego e no ordenamento urbano também figuram como dimensões cruciais da sustentabilidade social do BRT. Embora o sistema possa criar postos de trabalho e melhorar as condições laborais de antigos motoristas (Venter et al., 2017) o encarecimento do solo junto aos corredores BRT, como visto em Bogotá e Curitiba, acarreta riscos de exclusão socio espacial (Grande-Ayala & Navas-Gracias, 2025). Para mitigar tais

efeitos, algumas cidades adotam políticas de controlo de rendas ou aquisição de terrenos antes da inauguração dos corredores (Venter et al., 2018). A modernização da frota e a separação de faixas reduzem a sinistralidade entre veículos de transporte coletivo e podem melhorar a qualidade do ar, ao substituir autocarros antigos por outros menos poluentes (Hoonsiri et al., 2021; Venter et al., 2018).

2.8 O Papel do Hidrogénio na Mobilidade Urbana

O hidrogénio (H_2) é o elemento mais abundante no universo, apresentando uma elevada densidade energética por unidade de massa (cerca de 33 kWh/kg). No entanto, na Terra, não se encontra naturalmente no seu estado molecular puro, estando geralmente ligado a outros elementos. A sua utilização como vetor energético implica, portanto, a sua produção através de diversos processos, sendo posteriormente armazenado, transportado e utilizado em células de combustível para gerar eletricidade (Staffell et al., 2019). As células de combustível de hidrogénio funcionam através de um processo eletroquímico que combina hidrogénio e oxigénio para produzir eletricidade, calor e água como único subproduto. Nos veículos, esta eletricidade alimenta um motor elétrico, proporcionando uma alternativa de zero emissões no ponto de utilização (Wang et al., 2020).

De acordo com a literatura atual, o hidrogénio é frequentemente classificado por cores, conforme o seu método de produção e impacto ambiental associado:

- **Hidrogénio cinzento:** Produzido a partir de combustíveis fósseis (principalmente gás natural) através de reformação, sem captura de carbono.
- **Hidrogénio azul:** Produzido a partir de combustíveis fósseis, mas com captura e armazenamento de carbono.
- **Hidrogénio verde:** Produzido através de eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis.
- **Hidrogénio rosa/roxo:** Produzido através de eletrólise utilizando energia nuclear.

Do ponto de vista da sustentabilidade, apenas o hidrogénio verde (e potencialmente o azul e o rosa) apresenta benefícios significativos em termos de redução de emissões ao longo do ciclo de vida (International Energy Agency, 2022). Um dos principais benefícios da utilização do hidrogénio (especialmente o verde) na mobilidade urbana é a redução significativa de emissões de GEE e poluentes atmosféricos locais. Os veículos a hidrogénio emitem apenas vapor de água no ponto de utilização, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar urbano e a redução do ruído (Aminudin et al., 2023).

Estudos recentes demonstram que, quando produzido a partir de fontes renováveis, o hidrogénio pode proporcionar reduções significativas nas emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida (Lubecki et al., 2023 & Osman et al., 2024). Segundo Ajanovic e Haas (2021), os autocarros a hidrogénio podem reduzir as emissões de CO₂ em 60-80% em comparação com os autocarros a gasóleo, dependendo da fonte de energia utilizada na produção do hidrogénio. Existe então um consenso crescente de que o hidrogénio de baixo carbono terá um papel-chave na sustentabilidade futura, ajudando a reduzir as emissões da indústria e do transporte pesado, além de possibilitar o armazenamento de energia renovável em larga escala (Van Hulst, 2019).

Os veículos a hidrogénio apresentam benefícios operacionais que podem tornar-se vantajosos para o transporte público urbano, destacando-se a autonomia elevada, frequentemente entre 350 e 450 km, comparável aos veículos convencionais e superior à dos veículos elétricos a bateria (Iribarren et al., 2016). Além disso, o reabastecimento de hidrogénio ocorre em cerca de 10 a 15 minutos, um período consideravelmente mais curto do que o exigido para o carregamento de baterias, aumentando, teoricamente, a disponibilidade operacional (Aminudin et al., 2023). A combinação entre elevada autonomia e tempos de reabastecimento reduzidos traduz-se numa maior flexibilidade na gestão de frotas de transporte público, possibilitando uma operacionalização mais eficiente (Lozanovski et al., 2018). Consequentemente, a adoção de autocarros a hidrogénio pode contribuir para o desenvolvimento de soluções de mobilidade mais sustentáveis e eficazes nos centros urbanos.

O hidrogénio também apresenta oportunidades de integração com o sistema energético, funcionando como um vetor de armazenamento de energia a partir de fontes renováveis e contribuindo para a estabilização da rede (Nastasi & Lo Basso, 2016). Esta capacidade de armazenamento permite aproveitar os excedentes de eletricidade, promovendo uma maior eficiência e reduzindo desperdícios energéticos. Adicionalmente, as infraestruturas de hidrogénio podem assumir um papel multifuncional, ao abranger tanto veículos particulares como transportes públicos, o que maximiza o retorno do investimento e potencia a adoção generalizada desta tecnologia (Quarton et al., 2020).

Apesar dos benefícios inerentes, a adoção do hidrogénio enfrenta vários obstáculos técnicos, económicos e ambientais. Em primeiro lugar, o custo nivelado do hidrogénio

renovável continua 2 – 3 vezes superior ao do gasóleo para o transporte rodoviário, mesmo assumindo descidas rápidas no preço dos eletrolisadores, projeções otimistas para a Europa apontam para 4 – 6 €/kg em 2030 (Kotowicz et al., 2024). Em segundo lugar, o rendimento energético “well-to-wheel” permanece baixo; as perdas cumulativas da eletrólise, compressão/liquefação e conversão da célula de combustível fazem com que se consuma cerca de ~2,4 kWh de eletricidade para entregar 1 kWh mecânico no eixo, exigindo um *input* energético 2-3 vezes superior ao de um BE equivalente (Terlouw et al., 2024). A pegada hídrica também preocupa: a eletrólise consome no mínimo 9 L de água por kg-H₂ e estudos regionais reportam necessidades práticas entre 20–30 L/kg em cenários de purificação adicional, pressionando bacias já sujeitas a escassez (Lin et al., 2025). Do lado da infraestrutura, estações de abastecimento de autocarros revelam um CAPEX na ordem de 4–8 M€ para capacidades de 0,6–1 t/dia, enquanto dados de frotas piloto norte-americanas indicam disponibilidades operacionais iniciais dos autocarros de 75–85 % e custos de combustível de 8–9 US\$/kg, valores que ainda duplicam o custo por quilómetro comparativamente ao gasóleo (Post & Collins, 2023). A durabilidade limitada das células de combustível e a fiabilidade em serviço intensivo continuam a elevar o custo de operação (Wang et al., 2020). Em testes comparativos, os autocarros a hidrogénio consumiram 9,32–10,1 kg H₂ a cada 100km, o que considerando ~50kWh/kg para produzir H₂ verde, resulta num gasto elétrico quase duas vezes superior ao de autocarros a bateria (137–154 kWh/100km) para igual percurso (Estrada Poggio et al., 2023; International Renewable Energy Agency, 2020).

3. Metodologia

Este capítulo descreve o delineamento metodológico adotado para conduzir a análise comparativa entre o sistema *Light Rail Transit*, representado pelo Metro do Porto, e o sistema *Bus Rapid Transit*, representado pelo Metrobus projetado para o corredor da Boavista. A natureza complexa do objeto de estudo, que abrange dimensões técnicas, económicas, ambientais e sociais, exigiu a adoção de uma abordagem de métodos mistos, que combina técnicas de análise quantitativa e qualitativa para assegurar uma compreensão holística e aprofundada. A estrutura metodológica foi desenhada para responder de forma sistemática às questões de investigação e testar as hipóteses formuladas, triangulando dados de fontes secundárias e primárias para aumentar a validade e a fiabilidade dos resultados.

3.1 Abordagem da Investigação e Desenho do Estudo

A investigação adota um desenho de estudo de caso comparativo, centrado em dois sistemas de transporte na Área Metropolitana do Porto. A abordagem quantitativa é utilizada para as análises económica e ambiental, recorrendo a modelos de custo e cálculo de emissões. A abordagem qualitativa, materializada através de um inquérito por questionário, foca-se na dimensão social, captando as perceções, atitudes e expectativas dos cidadãos. Esta combinação permite não só comparar o desempenho objetivo dos sistemas, mas também contextualizá-lo no âmbito da aceitação pública e do impacto social percebido.

3.2 Questões de investigação e hipóteses

O estudo é orientado por três questões de investigação (QI) centrais, cada uma associada a uma hipótese de trabalho (H) que foi submetida a verificação empírica presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Questões/Hipóteses de Investigação

Dimensão	QI – Questão de Investigação	Hipótese (H)	Variáveis-chave*
Económica	QI1 – Qual dos sistemas apresenta menor custo total de propriedade (TCO) por passageiro-capacidade num horizonte de 30 anos?	H1 – O BRT-H ₂ tem um TCO (€/pax-capacidade) superior ao do LRT	CAPEX, OPEX, Valor residual, passageiros-capacidade.
		H2 – O LRT alimentado por eletricidade fotovoltaica apresenta emissões (g CO ₂ e/pax-km) inferiores às do BRT-H ₂	Consumo de energia, Fator de emissão, Ocupação.
Ambiental	QI2 – Qual dos sistemas regista menores emissões de GEE por passageiro-km?		

Social	QI3 – Qual dos sistemas gera maior aceitação e benefício social percebido pelos utentes?	H3 – O LRT gera impacto social mais positivo do que o BRT-H ₂	Índices de satisfação, intenção de uso, acessibilidade.
---------------	--	--	---

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Procedimentos de Recolha de Dados

A recolha de dados foi efetuada em duas fases complementares, envolvendo fontes secundárias e primárias.

3.3.1. Recolha de Dados Secundários

A análise comparativa técnica baseou-se numa extensa recolha de dados secundários, que incluiu:

1. Revisão da Literatura Académica: Consulta de artigos científicos, teses e livros sobre mobilidade sustentável, tecnologias LRT e BRT, e economia dos transportes, para estabelecer o enquadramento teórico e identificar indicadores-chave.
2. Análise Documental: Exame de relatórios técnicos, planos de mobilidade, relatórios de sustentabilidade (e.g., Metro do Porto), anúncios de concursos públicos (e.g., para o fornecimento dos veículos BRT) e resoluções do Conselho de Ministros. Estas fontes forneceram dados quantitativos essenciais sobre custos de investimento (CAPEX), custos operacionais (OPEX), consumos energéticos e especificações técnicas.
3. Estudos de Caso Internacionais: Com o objetivo de obter valores de referência sobre desempenho, custos e desafios operacionais, mitigando a ausência de dados empíricos sobre o projeto do Porto.

3.3.2. Recolha de Dados Primários

Para investigar a dimensão social (QI3 e H3), foi desenvolvido e aplicado um inquérito por questionário.

1. Instrumento: O questionário foi estruturado para avaliar as perceções, expectativas e preferências dos cidadãos relativamente aos dois sistemas. Utilizou-se predominantemente escalas de *Likert* de 5 pontos para medir o grau de concordância com afirmações sobre sustentabilidade, segurança, conforto, inovação e intenção de uso. O instrumento foi dividido em secções: caracterização sociodemográfica,

hábitos de mobilidade, percepção sobre o Metro do Porto, expectativas e confiança face ao Metrobus a hidrogénio, a percepção sobre o Metrobus e uma pergunta final para a comparação de ambos.

2. Amostragem e Aplicação: Devido a constrangimentos práticos, optou-se por uma amostragem não-probabilística por conveniência. O questionário foi divulgado online através de redes sociais e plataformas comunitárias, visando residentes da Área Metropolitana do Porto. O objetivo foi recolher uma amostra diversificada que, embora não sendo estatisticamente representativa, permitisse uma análise exploratória robusta das tendências de opinião. Foi obtida uma amostra final de 100 respostas válidas, um número considerado suficiente para a aplicação das técnicas estatísticas planeadas.

3.4 Procedimentos de Análise de Dados

Os dados recolhidos foram analisados através de diferentes técnicas, alinhadas com cada dimensão do estudo:

- Análise Económica (H1): Foi conduzida uma análise de Custo Total de Propriedade para um horizonte de 30 anos. O modelo integrou o CAPEX, o OPEX (incluindo custos de energia, manutenção e pessoal) e o valor residual dos ativos para ambos os sistemas. Os resultados foram normalizados por passageiro-capacidade para permitir uma comparação equitativa.
- Análise Ambiental (H2): As emissões de GEE foram calculadas segundo a norma EN 16258:2012, utilizando a métrica de gramas de CO₂ equivalente por passageiro-quilómetro (gCO₂e/pax-km). A análise considerou diferentes cenários de ocupação e de fontes energéticas (mix elétrico da rede vs. 100% renovável).
- Análise Social (H3): Os dados do inquérito foram analisados com o software SPSS. A análise incluiu:
 - Estatística Descritiva: Para caracterizar a amostra e resumir as percepções gerais.
 - Análise de Fiabilidade: O Alfa de Cronbach foi utilizado para testar a consistência interna dos índices compostos criados (Índice de Aceitação e Índice de Benefício Social Percebido).

- Estatística Inferencial: Foi aplicado o teste t para amostras emparelhadas para comparar as médias das percepções e dos índices LRT/BRT, permitindo testar a significância estatística das diferenças observadas.

A triangulação destes três eixos de análise permitiu construir uma avaliação integrada e multifacetada, fornecendo uma base para as conclusões do estudo.

4. Análise dos dados e discussão

4.1 Pressupostos LRT e BRT

Antes de iniciarmos os cálculos, a análise dos dados e a discussão, é preciso partir de pressupostos. Primeiramente e para assegurar a comparabilidade modal, foi construído um cenário em que o atual eixo Boavista-Império, futuramente servido pela linha de BRT, seria hipoteticamente servido por um LRT de superfície percorrendo a mesma extensão de 4 km ida e 4 km volta representado na Figura 3 e na Tabela 6.



Figura 3 – Traçado proposto para a linha BRT Império-Boavista

Fonte: Adaptado de Metro do Porto (2024).

Para determinar a frota necessária e a frequência de operação dos cenários BRT e LRT foi elaborada a Tabela 6, que sintetiza os pressupostos técnicos utilizados. Nesta tabela apresentam-se as principais variáveis do corredor em estudo, respetivos símbolos, valores de referência retirados da literatura e fontes. Estes parâmetros foram definidos com base em dados do Metro do Porto e outras fontes (ver Tabela 6) e servem de input para o cálculo do tempo de ciclo total e, consequentemente, do número de veículos necessários, conforme explicitado nas Equações seguintes.

Tabela 6 - Pressupostos do Corredor BRT/LRT

Variável	Símbolo	Valor literatura	Fonte
Comprimento da linha (sentido único)	D	4 km	Metro do Porto (2024)
Tempo da viagem já incluindo 7 paragens	Tr	12 minutos	Metro do Porto (2024)
Tempo de ciclo (ida-e-volta)	Tc	24 minutos	
Velocidade comercial resultante	$V = D/Tr$	20 km/h	

Layover/recovery mínimo	TL	10% do tempo de percurso	Pine et al. (1998)
Frequência pretendida	H	10 min	Metro do Porto (2024)
Frequência hora de ponta	P	5 min	Porto Canal (2025)

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos pressupostos apresentados na Tabela 6, procede-se ao cálculo dos parâmetros operacionais necessários ao dimensionamento do serviço. As Equações 4 e 5 permitem determinar, respetivamente, o tempo de *layover/recovery* mínimo e o tempo total de ciclo do veículo. A partir destes valores, as Equações (6) e (7) estimam o número de veículos (frota necessária) para garantir a frequência pretendida e a frequência em hora de ponta nos cenários BRT e LRT.

$$\text{Layover/Recovery mínimo} = TL = 0,10 * Tc = 2,4 \text{ minutos} \quad (4)$$

$$\text{Tempo do ciclo total} = Tc + TL = 26,4 \text{ minutos} \quad (5)$$

$$\text{Frota necessária para } H = N = \frac{\text{Tempo do ciclo}}{H} = \frac{26,4}{10} = [2,64] \Rightarrow 3 \text{ veículos} \quad (6)$$

$$\text{Frota necessária para } P = N = \frac{\text{Tempo do ciclo}}{P} = \frac{26,4}{5} = [5,28] \Rightarrow 6 \text{ veículos} \quad (7)$$

Assim, de acordo com as Equações 4,5 e 6, são necessários três veículos seja BRT ou LRT para garantirem um veículo com uma frequência a cada 10 minutos. No caso do BRT cada autocarro tem capacidade de 135 lugares (Metro do Porto, s.d), no caso do LRT cada veículo tem capacidade para 225 (Metro do Porto, s.d.), vamos considerar que cada veículo do Metro do Porto vai circular acoplado em duplas, possuindo assim uma capacidade de 450 passageiros por cada veículo acoplado. Na tabela 7 observa-se 3 cenários diferentes, o “Cenário Base BRT” em que circulam 3 veículos BRT por hora, o “Cenário com reforço BRT” em que circulam 3 veículos BRT por hora com reforço de mais 3 veículos BRT em horas de ponta (entre as 7-9 horas da manhã e entre as 17 e 19 horas da tarde), e o “Cenário base LRT” em que circulam 3 veículos LRT acoplados a cada hora sem reforço em horas de ponta.

Tabela 7 - Parâmetros operacionais e oferta de serviço nos três cenários modelados

	Período de Operação diário	Frequência (Período normal)	Frequência (Horas de ponta)	Nº de viagens diárias	Nº de viagens diárias (2 sentidos)	Distância diária total	Distância anual estimada	Passageiros transportados por dia
Cenário Base BRT	19 horas (1140 min)	10 minutos	10 minutos	114	228	912 km	332.880 km	30.780 pax
Cenário com reforço BRT	19 horas (1140 min)	10 minutos	5 minutos	138	276	1104 km	402.960 km	37.260 pax
Cenário base LRT	19 horas (1140 min)	10 minutos	10 minutos	114	228	912 km	332 880 km	114.912 pax

Nota: Assumindo que o reforço de horário de ponta do BRT (*headway* = 5 min) se aplica a 4 h/dia – duas de manhã (7-9 h) e duas à tarde (17-19 h). (Fonte: Elaboração própria).

4.2 Sustentabilidade Económica

O TCO é um modelo de análise reconhecido na literatura internacional como instrumento fundamental para a avaliação da viabilidade técnico-económica de investimentos, especialmente em setores com elevada intensidade de capital e custos operacionais distribuídos ao longo do tempo. O TCO integra todos os custos monetários correntes e futuros associados à aquisição, posse, operação, manutenção e eventual alienação de um ativo, permitindo uma avaliação holística do investimento num determinado horizonte temporal, como pode ser observado na Figura 4.

No contexto de investimentos em transporte coletivo, como é o caso da presente comparação entre sistemas de BRT e LRT, a literatura identifica geralmente dois grandes tipos de custos:

- 1- CAPEX – Engloba o custo de aquisição do material circulante – neste caso, autocarros a hidrogénio ou composições de metro ligeiro – bem como os custos de implementação da infraestrutura associada (corredores dedicados, estações, centros de manutenção, sistemas de sinalização e, no caso do BRT a hidrogénio, a infraestrutura de abastecimento).
- 2- OPEX – Que incluem todos os custos cumulativos de operação, manutenção, energia e despesas administrativas ao longo do ciclo de vida do sistema.

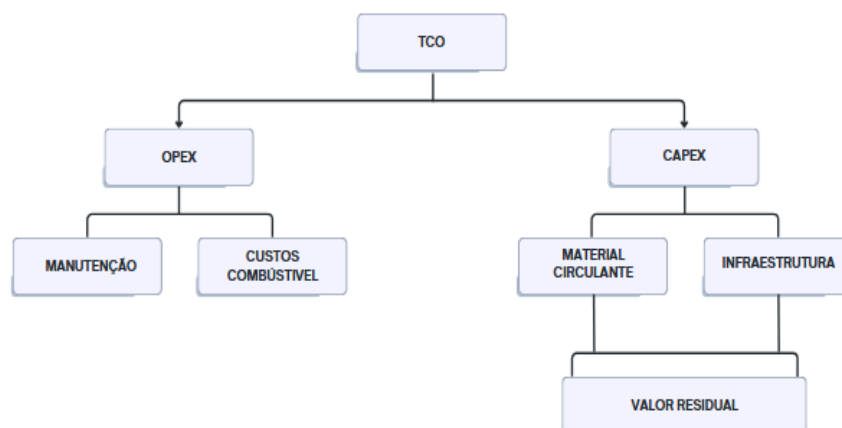


Figura 4 - Representação gráfica dos custos envolvidos no cálculo do TCO

Fonte: Elaboração própria

No caso específico dos autocarros a hidrogénio, os custos operacionais apresentam uma maior variabilidade e incerteza, sobretudo no que diz respeito ao consumo de energia. O custo do combustível constitui um dos principais vetores de incerteza uma vez que depende não só da eficiência energética do veículo, como também do preço da produção do hidrogénio verde, que varia substancialmente consoante a tecnologia utilizada, o contexto geográfico e os regimes de apoio em vigor. Devido à inexistência de dados operacionais consolidados sobre o sistema Metrobus do Porto, será necessário recorrer à literatura especializada e a estudos de casos internacionais para estimar o custo de hidrogénio verde e incorporar essa variável de forma realista no modelo de TCO.

Outro elemento considerado nesta análise é o valor residual dos ativos, isto é, o valor de revenda ou o benefício económico expectável no final da vida útil do veículo. Contudo, a determinação precisa do valor residual de autocarros a hidrogénio ou de composições de metro ligeiro reveste-se de elevada incerteza, uma vez que os mercados secundários para estas tecnologias ainda não se encontram suficientemente desenvolvidas ou normalizados. A maturidade limitada do mercado e a ausência de transações registadas dificultam a obtenção de dados robustos para suportar esta componente da análise.

O objetivo desta secção é então, avaliar qual dos dois sistemas — Metro do Porto ou o Metrobus a hidrogénio — terá um custo total de propriedade inferior, igual ou superior num horizonte de 30 anos, correspondendo à Hipótese H1:

H1— O BRT-H₂ tem um Custo Total de Propriedade (TCO) (€/pax-capacidade) superior ao do LRT

Para testar a hipótese H1 é necessário comparar, em bases homogêneas, todos os custos que cada sistema gera ao longo de um ciclo de $n=30$ anos. Em seguida, identifica-se as componentes de custo presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Componentes de custo utilizados na avaliação do Custo Total de Propriedade (TCO) ao longo de 30 anos

Símbolo	Significado
CAPEX	Investimento inicial
OPEX	Custos operacionais
$V_{Residual}$	Valor residual dos ativos que ainda têm vida útil ao fim do horizonte de análise.
n	Horizonte de análise (30 anos)

Fonte: Elaboração própria.

Depois de obter todos os fluxos obtemos a equação 8:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^n OPEX - V_{Residual} \quad (8)$$

4.2.1. CAPEX BRT

Como definido anteriormente o CAPEX engloba não só o custo de aquisição do material circulante como os custos de implementação da infraestrutura associada obtendo a equação 9:

$$CAPEX = Infraestrutura + Veículos \quad (9)$$

De acordo com a Resolução do Conselho de Ministros n.º 95/2025 o montante global do investimento para o projeto BRT é de 76 Milhões de euros (Diário da República, 2025), que engloba a infraestrutura da fase 1 (linha Boavista-Império) por 25 Milhões de Euros (Metro do Porto, 2022), da futura fase 2 (extensão Pinheiro Manso - Anémona) e 29,5 Milhões de euros para o material circulante (com manutenção assegurada durante 5 anos) e a construção da fábrica de hidrogénio verde (Metro do Porto, 2023). Portanto ao substituir na Equação 9 pelos valores da literatura obtemos o resultado do CAPEX na Equação 10.

$$CAPEX \text{ Linha Boavista} = 25 \text{ M€} + 29,5 \text{ M€} = 54,5 \text{ M€} \quad (10)$$

4.2.2. OPEX BRT

Vamos considerar o “Cenário com reforço BRT” presente na Tabela 7 em que o Metrobus percorre uma distância anual de 402.960 km. Para o consumo de hidrogénio, de acordo com a Caetano Bus (2023), temos especificações de 5,5kg/100km, no entanto se

verificarmos a Tabela 9 conseguimos verificar que, de acordo com a literatura, os autocarros nunca atingem essa eficiência.

Tabela 9 - Eficiência energética reportada na literatura para autocarros a hidrogénio

Literatura	Ano de referência	Eficiência Energética (kg/100km)
Fischer e Zenith (2020)	2015	9.5
Ally e Pryor (2016)	2016	10
Kolodziejski, Matuszak e Żabińska (2022)	2016	9
Fischer e Zenith (2020)	2020	9.5
Kim et al. (2021)	2020	8
Migliarese Caputi et al. (2022)	2020	8
Sadik-Zada et al. (2023)	2021	8
Malek et al. (2021)	2021	9
Borghetti et al. (2023)	2022	11
Di Vece et al. (2022)	2023	6.55
Sadik-Zada et al. (2023)	2025	8
Borghetti et al. (2023)	2025	10
Fischer e Zenith (2020)	2025	9.5
Borghetti et al. (2023)	2030	9
Di Vece et al. (2022)	2030	6.55
Fischer e Zenith (2020)	2030	9.5
Kim et al. (2021)	2030	8
Sadik-Zada et al. (2023)	2035	8
Média global		8.28

Fonte: Elaboração própria.

Vamos, então, considerar uma eficiência média de 8,28kg/100km ou seja 0,0828kg/km. Vamos também assumir um custo de produção do hidrogénio produzido a partir de eletrólise de renováveis a um valor 9.2 €/kg Migliarese Caputi et al. (2022) e para a manutenção temos mais uma vez uma recolha da literatura na tabela 10.

Tabela 10 - Custos unitários de manutenção e desgaste de autocarros a hidrogénio reportados na literatura (EUR / km)

Literatura	Ano de referência	Custos de manutenção e desgaste (EUR/km)
Ally e Pryor (2016)	2016	0.62
Fischer e Zenith (2020)	2020	0.4
Deloitte e Ballard Power Systems (2020)	2020	1.1
Kim et al. (2021)	2021	0.11
Malek et al. (2021)	2021	0.07
Di Vece et al. (2022)	2022	0.33
Migliarese Caputi et al. (2022)	2022	0.42
Sadik-Zada et al. (2023)	2023	0.5

Borghetti et al. (2023)	2023	0.33
Média global		0.43

Fonte: Elaboração própria.

Podemos então considerar uma manutenção de 0.43 €/km, prosseguindo com o cálculo do OPEX através da Equação 11 à Equação 16.

$$\text{Custo Combustível} = \text{Distância anual percorrida} * \text{Eficiência} * \text{Custo de produção} \quad (11)$$

$$\text{Custo Combustível} = 402.960 * 0,0828 * 9.2 = 306.959 \text{ €/ano} \quad (12)$$

$$\text{Custo Manutenção} = \text{Distância anual percorrida} * \text{Custo de Manutenção} \quad (13)$$

$$\text{Custo Manutenção} = 402.960 * 0.43 = 173.273 \text{ €/ano} \quad (14)$$

$$\text{Custo Motorista} = \frac{\text{Valor à hora}}{\text{Velocidade média}} * \text{Distância anual percorrida} \quad (15)$$

$$\text{Custo Motorista} = \frac{10\text{€/h}}{20\text{km/h}} * 402.960 = 201.480 \text{ €/ano} \quad (16)$$

$$\text{OPEX primeiros 5 anos} = \text{Custo Combustível} + \text{Custo Motorista} \quad (17)$$

$$\text{OPEX primeiros 5 anos} = 306.959 + 201.480 = 508.439 \text{ €} \quad (18)$$

$$\text{OPEX restante anos} = \text{Custo Combustível} + \text{Custo Motorista} + \text{Custo Manutenção} \quad (19)$$

$$\text{OPEX restante anos} = 306.959 + 201.480 + 173.273 = 681.712 \text{ €} \quad (20)$$

Na Equação 17 é descartado o valor da manutenção nos primeiros 5 anos sendo este assegurado pelo consórcio do Metrobus do Porto (Metro do Porto, 2023), a Equação 19 e 20 vai corresponder aos restantes anos em que a manutenção já não está incluída pelo consórcio.

4.2.3. Valor residual BRT

De acordo com a literatura, o corredor BRT, ao fim de 30 anos, já tem a sua vida totalmente consumida, portanto o valor residual é nulo (International Accounting Standards Board, 2022). Após 30 anos de utilização a vida útil de 15 anos dos veículos e da estação de hidrogénio já está a chegar ao fim pela 2ª vez. Adotou-se então um valor de sucata de 8% do CAPEX dos veículos para refletir a venda para peças/reciclagem, como recomendado na

literatura (International Accounting Standards Board, 2022) e apresentado na Equação 21 e 22 no final dos 15 anos e pela Equação 23 e 24 no final dos 30 anos

$$V_{Residual} BRT = (Veículos + Estação H2) * Valor de sucata \quad (21)$$

$$V_{Residual} BRT em 15 anos = 29,5M€ * 0,08 = 2,36M€ \quad (22)$$

Valor residual total (nominal, ano 30):

$$V_{Residual} BRT em 30 anos = Valor Residual BRT em 15 anos * 2 \quad (23)$$

$$V_{Residual} BRT em 30 anos = 2,36 M€ * 2 = 4,72 M€ \quad (24)$$

4.2.4. Cálculo TCO BRT

Tabela 11 - Cálculo TCO BRT

Anos	0	1-5	6	7	8-14	15	16-20	21-29	30	Total
Infraestrutura	25	0	0	0	0	0	0	0	0	25 M€
Veículos/Fábrica H₂	29,5	0	0	0	0	29,5	0	0	0	59 M€
OPEX	0	2,54	0,68	0,68	4,77	0,68	3,41	6,14	0,68	19,58M€
Valor residual (-)	0	0	0	0	0	-2,36	0	0	-2,36	-4,72 M€
TCO										98.86M€

Fonte: Elaboração própria.

4.2.5. CAPEX LRT

Para fazer uma análise comparativa metodologicamente correta obteve-se da literatura o preço médio por quilómetro de 4 linhas com características semelhantes às características da linha do Metrobus da Boavista (sem túneis ou viadutos) que podem ser observados na Tabela 3, considerou-se então um custo de 24M€ por quilómetro que é o valor médio de projetos recentes de *tramway* em países desenvolvidos sem secções em túnel. Multiplicou-se esse valor pela extensão de 4 quilómetros o que resulta num valor de 96 M €, um valor que é quase quatro vezes superior ao investimento de 25 M € que foi utilizado no corredor BRT para o mesmo trajeto (ACP, 2025) esta discrepância vai de acordo com a literatura (Institute for Transportation and Development Policy, s.d.). Vamos também supor um novo concurso público para uma frota que consiga fazer o mesmo serviço que o Metrobus vai realizar, o Metrobus vai circular com 1 veículo a cada 10 minutos o que são 3 veículos por hora para assegurar essa frequência, mas devido a ter uma menor capacidade comparativamente ao LRT vamos considerar um reforço de mais 3 veículos em horas de ponta para assegurar uma maior capacidade.

No nosso caso hipotético, vamos usar o “Cenário Base LRT” presente na Tabela 7, onde vamos manter a frequência de 10 minutos com 3 veículos acoplados o que dá cerca de 6 carruagens a operar no corredor. Segundo o valor do último concurso público em que 22 veículos tiveram um custo de 69,5 M€ conseguimos extrapolar o valor de cada veículo a 3,16 M€ (Metro do Porto, 2025), sendo que necessitamos de 6 carruagens daria um valor de 18,96 M€.

$$CAPEX = Infraestrutura + Veículos \quad (25)$$

$$CAPEX = 96 + 18,96 = 114.92 \text{ M €} \quad (26)$$

4.2.6. OPEX LRT

Para estimar o Custo Operacional Unitário do cenário LRT utiliza-se o indicador “euro por comboio-quilómetro” (€/CKm), que integra a extensão da infraestrutura, a frota disponível e o nível de serviço. Este indicador corresponde à razão entre a despesa operacional anual e a produção anual em comboio-quilómetro, conforme expresso na Equação 27. O valor unitário foi calibrado com dados do Metro do Porto referentes a 2018, ano em que se registou uma despesa operacional de 38,6 M€ (Diário de Notícias, 2019).

$$\text{Custo Operacional Unitário} = \frac{\text{Despesa Operacional anual}}{\text{Produção anual (CKm)}} \quad (27)$$

A Produção anual (CKm) corresponde ao total de quilómetros percorridos pelas composições em operação durante um ano, sendo expressa em “comboio-quilómetro” (CKm). Um comboio-quilómetro corresponde a uma composição que percorre 1 km. No caso do Metro do Porto, em 2018, cada veículo percorreu em média 48 000 km/ano. Considerando 102 veículos em operação, obtém-se a produção anual total através da multiplicação dos quilómetros anuais por veículo pelo número total de veículos, o que fornece o denominador utilizado na Equação 28.

$$\text{Custo Operacional Unitário} = \frac{38,6 \text{ M€}}{4,9 * 10^6} \approx 7,9 \text{ €/CKm} \quad (28)$$

Obtendo o valor do Custo Operacional Unitário podemos agora multiplicar pelo valor da distância percorrida do nosso cenário base LRT (Equação 29) e obtemos o valor de OPEX com a Equação 30.

$$OPEX \text{ Cenário Base LRT} = \text{Custo Operacional Unitário} * \text{Distância Percorrida} \quad (29)$$

$$OPEX \text{ Cenário Base LRT} = 7,9\text{€/CKm} * 332\,880 \text{ CKm} \approx 2,63 \text{ M€/ano} \quad (30)$$

4.2.7. Valor residual LRT

Os ativos cujas vidas económicas excedem o horizonte analítico de 30 anos mantêm um valor contabilístico no final do projeto (International Accounting Standards Board, 2022). Esse valor residual calcula-se, assumindo amortização linear, pela Equação 31.

$$V_{Residual} LRT = CAPEX * \frac{Vida económica - T}{Vida económica} \quad (31)$$

Onde T é o número de anos decorrido até ao fim do horizonte, neste caso, T=30 anos. A infraestrutura tem vida projetada de 40 anos (Hausberger et al., 2023) e os veículos LRT têm uma vida projetada de 30 anos (Federal Transit Administration, 2016), substituindo na Equação 32 vai resultar num valor residual da Infraestrutura de 24 M€ como indicado na Equação 33.

$$V_{Residual} \text{Infraestrutura LRT} = CAPEX \text{Infraestrutura} * \frac{Vida económica - T}{Vida económica} \quad (32)$$

$$V_{Residual} \text{Infraestrutura LRT} = 96\text{M€} * \frac{40 - 30}{40} = 24\text{M€} \quad (33)$$

Após 30 anos de utilização a vida útil dos veículos LRT acabou, adotou-se então um valor de sucata de 8% do CAPEX dos veículos para refletir a venda para peças/reciclagem, como recomendado na literatura (International Accounting Standards Board, 2022) e apresentado na Equação 34 e 35.

$$V_{Residual} \text{Veículos LRT} = CAPEX \text{Veículos} * \text{Valor Sucata} \quad (34)$$

$$V_{Residual} \text{Veículos LRT} = 18,96\text{M€} * 0,08 = 1,52\text{M€} \quad (35)$$

Obtemos então o Valor residual total ao fim de 30 anos na Equação 36 e 37.

$$V_{Residual} LRT 30n = VR \text{Infra} + VR \text{veículos LRT} \quad (36)$$

$$V_{Residual} LRT 30n = 24 + 1,52 = 25,52 \text{ M€} \quad (37)$$

4.2.8. Cálculo TCO LRT

Tabela 12 - *Cálculo TCO LRT*

Anos	0	1	2	3-14	15	16-29	30	Total
Infraestrutura	96	0	0	0	0	0		96
Veículos	18,96	0	0	0	0	0		18,96
OPEX	0	2,63	2,63	31,56	2,63	36,82	2,63	78,9
Valor residual	0	0	0	0	0	0	-25,52	-25,52
TCO								168.34 M€

Fonte: Elaboração própria.

4.2.9. Discussão da Sustentabilidade Económica

De acordo com a avaliação de custos de ciclo de vida realizada para um horizonte analítico de 30 anos, o sistema BRT exige um investimento global de 98,86 M€, em contrapartida o LRT ascende a 168.34 M€, ou seja, o LRT apresenta um custo total de cerca de 70% superior à alternativa BRT. À primeira observação, tal diferença sugere que o BRT seria a alternativa financeiramente mais favorável. Todavia, a leitura altera-se quando o montante investido é ponderado pela capacidade efetiva de transporte de cada solução. No cenário modelado, o BRT permite movimentar 37.260 passageiros/dia, enquanto o LRT atinge 114.912 passageiros/dia, o que representa uma capacidade 3,1 vezes superior ao BRT.

Para compatibilizar grandezas, divide-se o TCO pelo número total de “passageiros-capacidade” disponíveis durante todo o horizonte (capacidade diária $\times$ 365 dias $\times$ 30 anos) observável na Tabela 13.

Tabela 13 - *Custo por passageiro-capacidade num horizonte de 30 anos*

Indicador	BRT	LRT
TCO (30 anos)	98.86 M€	168.34 M€
Capacidade passageiros em 30 anos	$37.260 \times 365 \times 30 = 408$ M	$114.912 \times 365 \times 30 =$ 1258M
Custo por passageiro-capacidade	$\approx 0,24$ €	$\approx 0,13$ €

Fonte: Elaboração própria.

Embora o LRT exija um investimento mais elevado, o seu custo unitário por passageiro-capacidade é cerca de 46% inferior ao do BRT (0,13 € vs. 0,24 €). Em síntese, o metro ligeiro revela-se economicamente mais eficiente sempre que a comparação considera a procura potencial ou a capacidade de oferta, justificando a sua adoção em corredores com elevada ou crescente intensidade de tráfego.

4.3 Sustentabilidade Ambiental

O objetivo desta secção é avaliar qual dos dois sistemas — Metro do Porto ou o Metrobus a hidrogénio — apresenta menor pegada de carbono por passageiro-quilómetro (g CO₂e/pkm), respondendo à Hipótese H₂:

H₂ — O LRT alimentado por eletricidade fotovoltaica apresenta emissões (g CO₂e/pax-km) inferiores às do BRT-H₂

De acordo com a norma EN 16258:2012 apresenta a equação-tipo em que as emissões de GEE por passageiro-km resultam do produto entre o consumo específico de combustível ou energia por veículo-km e o fator de emissão correspondente, dividido pela carga média de passageiros (European Committee for Standardization, 2012), presente na Equação 28.

$$\text{Emissões de CO}_2\text{e por pessoa por km} = \frac{(C_{\text{energia}} \times FE_{\text{energia}})}{O_{\text{média}}} \quad (38)$$

Em que, C_{energia} é o consumo específico de energia por veículo-quilómetro (kWh/veículo/km); FE_{energia} é o fator de emissão associado ao tipo de energia utilizada (gCO₂e/kWh); $O_{\text{média}}$ corresponde à ocupação média do veículo (número médio de passageiros).

4.3.1. Cálculo da Sustentabilidade Ambiental LRT

Foi usado os valores referentes ao ano de 2019 para o consumo de energia de cada veículo/km do Metro do Porto, o fator de emissão da energia utilizada segundo o *mix* energético e a taxa de ocupação devido a ser um ano “normal”. Os anos de 2020, 2021 e 2022 foram afetados pela pandemia COVID-19 e os anos de 2023, 2024 e 2025 não foram utilizados devido à falta de dados disponíveis.

$$C_{\text{energia}} \approx 5,55 \text{ kWh/vkm (Metro do Porto, 2022).}$$

$$FE_{\text{energia}} = 0,235 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh (Autoridade da Mobilidade e dos Transportes, 2021).}$$

$$\text{Ocupação} = 173 \text{ lugares em pé e } 52 \text{ lugares sentados equivale a um total de } 225 \text{ lugares (Metro do Porto, s.d).}$$

A Tabela 14 e o gráfico da figura 4 foram criados com o objetivo de visualizar as emissões específicas de CO₂e (g/pax-km) do Metro do Porto em função da taxa de ocupação com base na Equação 38.

Tabela 14 - LRT (cenário base, mix elétrico de 2019)

Ocupação (%)	Ocupação (nº passageiros)	Emissões (g CO ₂ e/pax-km)
10	22	59
20	45	29
30	68	19
40	90	14
50	112	12
60	135	10
70	158	8
80	180	7
90	202	6
100	225	6

Fonte: Elaboração própria.

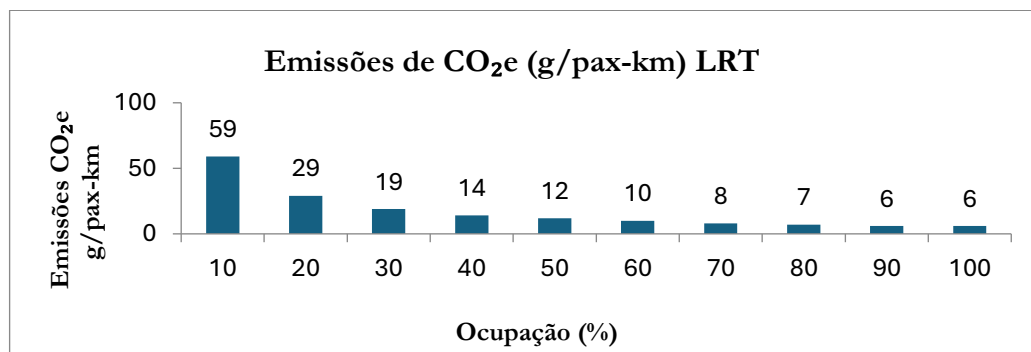


Figura 4 - Efeito da ocupação na redução das emissões de CO₂e por passageiro-km para um LRT (capacidade 225 passageiros) alimentado pelo mix energético português. (Fonte: Elaboração própria).

Agora vamos considerar um cenário alternativo em que o Metro do Porto era fornecido energia renovável a partir de painéis fotovoltaicos visualizado na Tabela 15 e no gráfico da figura 5.

$$C_{energia} \approx 5,55 \text{ kWh/vkm (Metro do Porto, 2022).}$$

$$FE_{energia} \approx 0.040 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2022)}$$

Tabela 15 - LRT (cenário renovável fotovoltaico)

Ocupação (%)	Ocupação (nº passageiros)	Emissões (g CO ₂ e/pax-km)
10	22	10
20	45	5
30	68	3
40	90	2
50	112	2

60	135	2
70	158	1
80	180	1
90	202	1
100	225	1

Fonte: Elaboração própria.

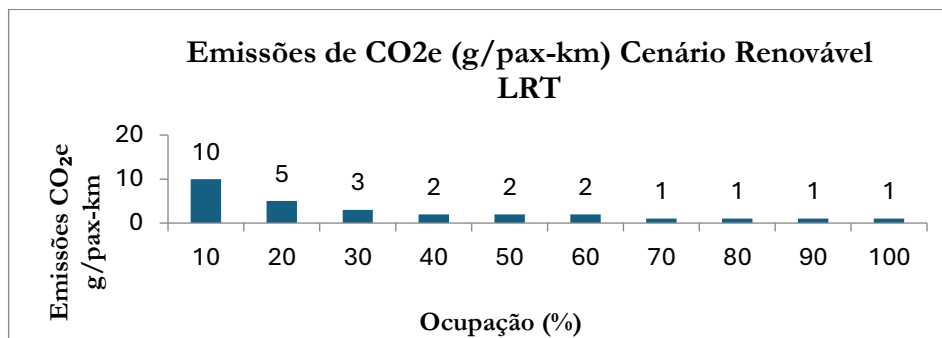


Figura 5 -Efeito da ocupação na redução das emissões de CO₂e por passageiro-km para um LRT (capacidade 225 passageiros) alimentado por energia fotovoltaica. (Fonte: Elaboração própria).

4.3.2. Cálculo da Sustentabilidade Ambiental BRT

Substituindo agora novamente os valores da Equação 38 pelos novos valores referentes ao consumo de energia, fator de emissão e ocupação referentes ao BRT obtemos os resultados na Tabela 16 e o gráfico da figura 6.

$$C_{energia} \approx 0,092 \text{ €/kg/vkm (Migliarese Caputi et al.,2022).}$$

$$FE_{energia} = 2,5 \text{ kg CO}_2 \text{ kgH}_2 \text{ (Patel et al., 2024).}$$

$$Ocupação = 135 \text{ passageiros (Metro do Porto, s.d)}$$

Conseguimos também observar o efeito da ocupação na redução das emissões de CO₂e por passageiro-km para um BRT-H₂ verde

Tabela 16 - BRT-H₂ (cenário hidrogénio)

Ocupação (%)	Ocupação (nº passageiros)	Emissões (g CO ₂ e/pax-km)
10	14	16
20	27	9
30	40	6
40	54	4
50	68	3
60	81	3
70	94	2
80	108	2
90	122	2

100	135	2
-----	-----	---

Fonte: Elaboração própria.

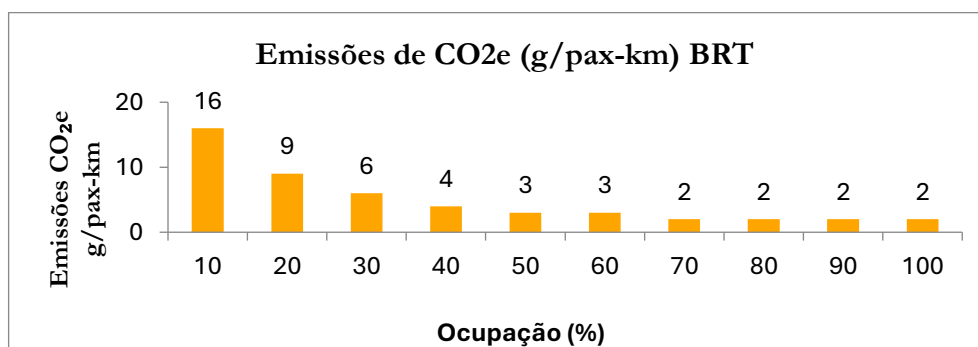


Figura 6 - Efeito da ocupação na redução das emissões de CO₂e por passageiro-km para um BRT articulado (capacidade 135 passageiros) movido a hidrogénio. (Fonte: Elaboração própria).

4.3.3. Discussão da Sustentabilidade Ambiental

Como se pode observar no gráfico da figura 4, as emissões específicas do LRT com *mix* elétrico de rede (*Grid*) descem de 59 g CO₂e/pax-km aos 10 % de ocupação para apenas 6 g CO₂e/pax-km quando o veículo circula totalmente lotado (100 %). Esta relação hiperbólica confirma que a intensidade carbónica por passageiro-quilómetro diminui de forma inversamente proporcional ao número de passageiros transportados.

O mesmo comportamento verifica-se para o LRT alimentado por eletricidade fotovoltaica (PV) no gráfico da figura 5, mas com valores absolutos muito inferiores (10 → 1 g CO₂e/pax-km). A alteração do fator de emissão da energia, de 0,235 kg CO₂e/kWh (fator de emissão do *mix* elétrico nacional) para 0,040 kg CO₂e/kWh (fator de emissão do ciclo de vida dos painéis solares), reduz as emissões em ~83 % para qualquer nível de ocupação, evidenciando o peso da descarbonização do fornecimento elétrico.

Para o BRT a hidrogénio (ver gráfico da figura 6), o declínio com a ocupação é semelhante, mas parte de uma base já moderada: 16 → 2 g CO₂e/pax-km entre 10 % e 100 %. A intensidade inicial mais baixa resulta do combustível utilizado, hidrogénio verde, que é produzido por energia renovável que neste cenário são painéis fotovoltaicos.

No gráfico da figura 7 observamos que, para todo o intervalo de ocupações, o BRT-H₂ apresenta emissões inferiores às do LRT-Grid mesmo com lotação máxima, o LRT

permanece em 6 g CO₂e/pax-km, contra 2 g CO₂e/pax-km do BRT. Esta desvantagem do LRT decorre essencialmente da elevada intensidade carbónica do *mix* elétrico português de 2019 (235 g CO₂e / kWh), o qual anula os ganhos de eficiência inerentes à tração elétrica e à maior capacidade. Assim, sob condições de rede não descarbonizada, o transporte coletivo rodoviário propulsionado a hidrogénio verde pode ser ambientalmente preferível ao metro ligeiro.

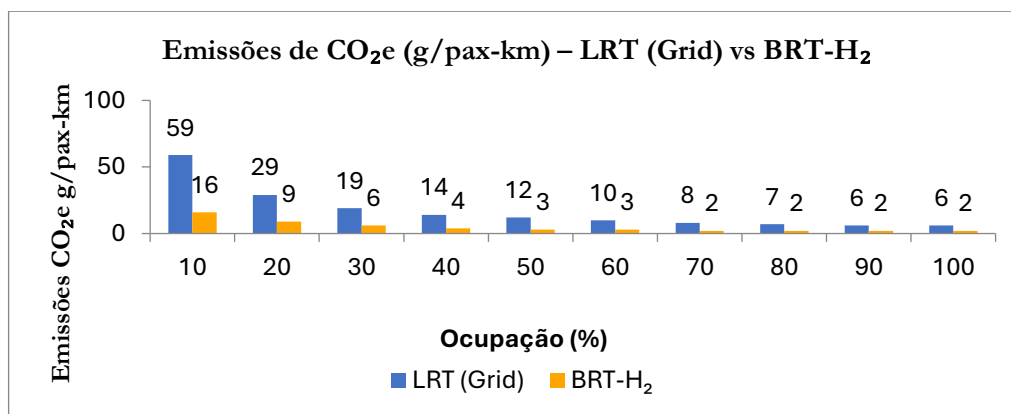


Figura 7 - LRT (mix elétrico de rede) vs BRT-H₂. (Fonte: Elaboração própria).

No entanto, o panorama altera-se radicalmente quando o LRT adota eletricidade proveniente de energia solar, como se pode verificar no gráfico da figura 8, o LRT-PV ultrapassa sistematicamente o BRT-H₂ em desempenho ambiental, apresentando 10 g CO₂e/pax-km logo aos 10 % de ocupação e caindo para ~1 g CO₂e/pax-km acima dos 70 %. A razão é dupla:

1. Fator de emissão reduzido (40 g CO₂e/kWh) devido à geração solar, semelhante ao BRT-H₂
2. Maior capacidade nominal (225 vs 135 passageiros), que amplifica o efeito da diluição das emissões pelo número de utilizadores.

Estes resultados confirmam que a eletrificação alimentada por fontes renováveis constitui a estratégia mais eficaz para minimizar emissões no transporte urbano pesado, superando inclusive vetores energéticos emergentes como o hidrogénio verde.

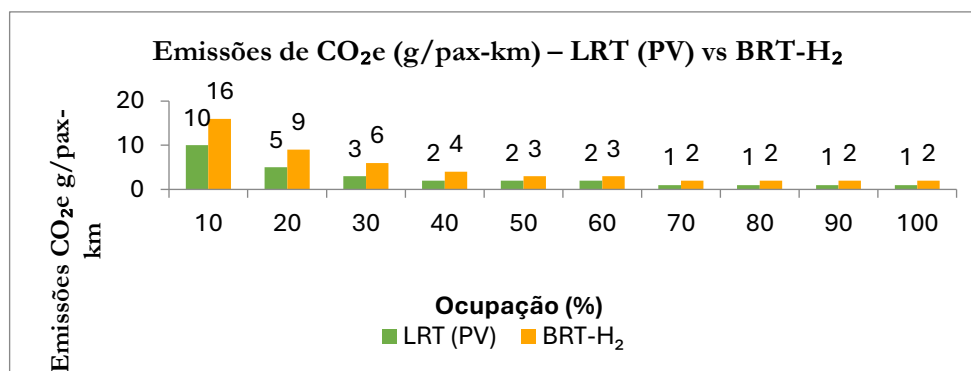


Figura 8 - LRT (electricidade fotovoltaica) vs BRT-H₂. (Fonte: Elaboração própria).

No cenário de rede elétrica convencional, as emissões por veículo-km do LRT são cerca de 1,30 kg CO₂e/v-km ($5,55 \text{ kWh/v-km} \times 0,235 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$) enquanto para o BRT-H₂ se situam em $\approx 0,23 \text{ CO}_2\text{e/v-km}$ (valor inferido das Tabelas 14 e 16). A igualdade das emissões por passageiro-km entre ambos ocorreria apenas se a ocupação do LRT fosse aproximadamente 5,7 vezes a do BRT, algo inviável com um único veículo dado o diferencial de capacidade (225 vs 135 lugares). Tal paridade só seria exequível com composições LRT acopladas; de contrário, o LRT (*Grid*) tenderá a apresentar emissões por passageiro-km superiores às do BRT-H₂ para as mesmas taxas de ocupação. Já sob fornecimento renovável (LRT-PV), o LRT torna-se consistentemente mais limpo do que o BRT-H₂, evidenciando o papel determinante da descarbonização do *mix* elétrico.

4.4 Sustentabilidade Social

Este capítulo dedica-se à apresentação e análise dos dados recolhidos através do inquérito aplicado a uma amostra de 100 participantes. O questionário foi distribuído online, recorrendo a redes sociais e plataformas comunitárias, e dirigido a residentes da Área Metropolitana do Porto. Esta estratégia de recolha baseou-se numa amostragem não-probabilística por conveniência, permitindo obter um conjunto diversificado de respostas, ainda que não estatisticamente representativo. O objetivo é realizar uma análise estatística detalhada para comparar a perceção e aceitação do sistema de transporte Metro do Porto em contraste com o futuro Metrobus a hidrogénio. A análise está estruturada para, em última instância, testar a hipótese de investigação H3:

H3 – O LRT gera impacto social mais positivo do que o BRT-H₂

A análise inicia-se com a caracterização sociodemográfica da amostra, seguida pela avaliação dos fatores prioritários na escolha de um transporte público. Posteriormente, são analisadas as perceções sobre cada um dos sistemas e, finalmente, comparados os índices de aceitação e de benefício social percebido para validar a hipótese formulada.

4.4.1. Caracterização da amostra

A amostra do estudo é constituída por 100 indivíduos. A sua caracterização sociodemográfica e de hábitos de utilização do transporte é fundamental para contextualizar os resultados subsequentes. A amostra apresenta uma distribuição equilibrada em termos de género, com uma ligeira predominância de participantes do sexo masculino (53,0%). Em relação à idade (ver Tabela 17), a maioria dos inquiridos concentra-se nas faixas mais jovens, com 42,0% situados entre os 25 e os 34 anos e 39,0% entre os 18 e os 24 anos, representando em conjunto 81,0% do total da amostra.

Tabela 17 - Distribuição da Amostra por Faixa Etária

<i>Idade</i>	<i>Frequência</i>	<i>Percentagem</i>
18-24	39	39.0
25-34	42	42.0
35-44	2	2.0
45-54	9	9.0
55-64	6	6.0
≥65	2	2.0
Total	100	100.0

Fonte: Dados extraídos da tabela de frequências de idade

O nível de escolaridade dos respondentes é elevado: 43% a deterem uma licenciatura e 32% um mestrado, indicando que 75% da amostra possui formação superior. Profissionalmente, 70% são trabalhadores por conta de outrem, seguidos por estudantes (15%).

O rendimento mensal líquido do agregado familiar, reportado por 84 dos 100 inquiridos, mostra que a faixa modal é de 900€ a 1300€, compreendendo 45,2% das respostas válidas. Geograficamente, a amostra é predominantemente oriunda da Área Metropolitana do Porto, destacando-se os concelhos de Matosinhos (44%), Porto (21%) e Vila Nova de Gaia (7%).

Quanto à utilização do Metro do Porto, a frequência é variada. A maioria dos inquiridos utiliza-o de forma esporádica (27% "muito esporadicamente" e 25% "raramente"), enquanto 25% o utilizam de forma intensiva (14% diariamente e 11% várias vezes por

semana). O principal motivo de uso divide-se entre lazer/compras (35%), visitas ocasionais (32%) e deslocações pendulares casa-trabalho (25%).

4.4.2. Análise dos fatores de Escolha de Transporte

Para compreender as prioridades dos utentes na escolha de um meio de transporte, foi solicitado aos inquiridos que ordenassem sete fatores, do mais (1) ao menos importante (7). Para analisar estas ordenações, foi aplicado o método de contagem de Borda. Este método converte cada *rank* atribuído a um fator num *score* (pontuação), através da fórmula “Score=8–Rank”. A média destes *scores* permite hierarquizar os fatores de forma clara e objetiva.

Os resultados, apresentados na Tabela 18, revelam uma hierarquia de prioridades bem definida na perspetiva dos utilizadores.

Tabela 18 - Hierarquização dos Fatores de Escolha de Transporte Público via Método de Borda

Fator	Média de score	Interpretação
Tempo	5.77	Mais prioritário
Custo	4.94	Muito relevante
Pontualidade	4.27	Relevante
Conforto	3.59	Moderado
Segurança	3.51	Moderado
Acessibilidade	3.17	Menor relevância relativa
Impacte ambiental	2.69	Último na hierarquia

Nota: A média de *score* resulta da conversão do *ranking* (1=mais importante, 7=menos importante) numa pontuação. Quanto maior o score, maior a prioridade atribuída. (Fonte: Elaboração própria)

A análise demonstra que os aspetos pragmáticos e funcionais do serviço são os mais valorizados. O Tempo de viagem surge como o fator mais crítico (M = 5,77), seguido de perto pelo Custo (M = 4,94). A Pontualidade (M = 4,27) completa o pódio dos fatores mais relevantes. Em contrapartida, o Impacto Ambiental (M = 2,69) foi classificado como o fator menos prioritário, sugerindo que, apesar da crescente consciência ecológica, as preocupações ambientais são secundarizadas face a critérios de eficiência e economia na decisão quotidiana do transporte.

4.4.3. Perceção sobre o Metro do Porto e o Metrobus

A perceção geral sobre o serviço existente do Metro do Porto foi avaliada numa escala de 1 a 5. Os resultados descritivos (Tabela 19) indicam uma avaliação globalmente positiva. O atributo mais bem classificado foi a sua contribuição para a redução da poluição (M = 4,22), seguido pela pontualidade (M = 3,74) e segurança (M = 3,69). A acessibilidade

(M = 3,35) e o preço (M = 3,43) foram os itens com avaliação média mais baixa, embora ainda acima do ponto médio da escala.

Tabela 19 - Estatísticas Descritivas da Percepção sobre o Metro do Porto

Atributo de percepção	Média	Desvio Padrão
Contribuição antipoluição	4,22	1,001
Pontualidade	3,74	0,991
Segurança	3,69	0,982
Conforto	3,52	0,858
Modernidade	3,47	0,989
Satisfação Geral	3,46	0,968
Preço	3,43	1,174
Acessibilidade	3,35	0,999

Nota: Escala de 1 (avaliação muito negativa) a 5 (avaliação muito positiva). (Fonte: Elaboração própria).

A percepção geral sobre o futuro Metrobus foi avaliada numa escala de 1 a 5. Os resultados descritivos (Tabela 20) indicam uma avaliação globalmente positiva. O atributo mais bem classificado foi a vontade dos utilizadores usufruírem, assim que disponível, do Metrobus (M = 3,88), seguido pela segurança (M = 3,84) e a contribuição antipoluição (M = 3,83). A acessibilidade (M = 3,13) e a comparação de ser tão bom quanto o metro (M = 2,97) foram os itens com avaliação média mais baixa, embora ainda acima do ponto médio da escala.

Tabela 20 - Estatísticas Descritivas da Percepção sobre o Metrobus

Atributo de percepção	Média	Desvio Padrão
Vai utilizar	3.88	.967
Segurança	3.84	.838
Contribuição antipoluição	3.83	.865
Modernidade	3.80	1.073
Concorda com implementação	3.68	.973
Benefício económico	3.44	1.008
Economicamente viável	3.20	.953
Acessibilidade	3.13	.849
Tão bom quanto metro	2.97	.989

Nota: Escala de 1 (avaliação muito negativa) a 5 (avaliação muito positiva). (Fonte: Elaboração própria).

4.4.4. Análise comparativa direta: Metro vs Metrobus

Para uma comparação direta, foi realizado um teste t para amostras emparelhadas em quatro itens conceptuais equivalentes. Os resultados (Tabela 21) mostram diferenças estatisticamente significativas em duas dimensões.

Tabela 21 - Comparação Emparelhada de Percepções: Metro vs. Metrobus

Par	Diferença média	IC95%	T(df)	P(bilateral)	Conclusão
Segurança	-0.150	[-0.396; 0.096]	-1.208 (99)	.230	Sem diferença significativa
Modernidade/Inovação	-0.330	[-0.639; -0.021]	-2.119 (99)	.037	Metrobus percebido como mais inovador
Acessibilidade	0.220	[-0.017; 0.457]	1.842 (99)	.068	Diferença marginal, não significativa
Ambiente	0.390	[0.126; 0.654]	2.927 (99)	.004	Metro percebido como mais eficaz na redução de poluição

Nota: A diferença média foi calculada como (Metro – MetroBus). Um valor negativo favorece o MetroBus e um positivo favorece o Metro. (Fonte: Elaboração própria).

Conforme os dados, o Metrobus é percebido como significativamente mais inovador ($p=.037$), enquanto o Metro do Porto é considerado mais eficaz na redução da poluição ($p=.004$). Para os atributos de segurança e acessibilidade, as diferenças observadas não são estatisticamente significativas ao nível de 5%.

4.4.5. Análise dos índices de Aceitação (IA)

Para obter uma medida global da aceitação de cada sistema, foram construídos dois índices compósitos: o Índice de Aceitação do Metro (IA_Metro) e o Índice de Aceitação do Metrobus (IA_Metrobus).

1. IA_Metro: Construído a partir de seis itens de percepção sobre o serviço atual, incluindo satisfação, conforto, segurança, preço, modernidade e pontualidade. Este índice demonstrou boa consistência interna, com um Alfa de Cronbach de $\alpha=.778$.
2. IA_Metrobus: Foi inicialmente composto por seis itens que captam dimensões complementares: avaliação comparativa da qualidade do serviço, necessidade percebida da introdução do novo sistema, intenção de uso, concordância com a implementação, adequação da solução ao trajeto e probabilidade de utilização frequente. As perguntas incluídas abordaram, por exemplo, se os inquiridos consideravam que o Metrobus a hidrogénio ofereceria um serviço tão bom quanto o Metro do Porto, se viam a introdução deste novo sistema como necessária ou desnecessária, se estariam dispostos a utilizá-lo quando disponível, se concordavam com a sua implementação no sistema de transporte público do Porto, se consideravam que era ou não a melhor opção para o troço em causa face a alternativas como o prolongamento do Metro do Porto, e qual a probabilidade de utilizarem o novo serviço

com frequência assumindo características semelhantes às do Metro atual. Esta seleção de itens teve como racional cobrir tanto percepções positivas (qualidade do serviço, intenção de utilização, concordância com a implementação e probabilidade de uso) como percepções críticas (necessidade e adequação ao trajeto). A análise de fiabilidade inicial revelou consistência interna fraca ($\alpha = 0,450$) (Tabela 22), sobretudo devido à correlação negativa dos itens formulados de forma negativa (“Não considero necessária a introdução do Metrobus...” e “O Metrobus não é a melhor opção”). Após a remoção destes itens negativos, o índice final ficou composto por quatro itens positivos, alcançando uma consistência interna aceitável ($\alpha = 0,710$).

Tabela 22 - Análise de Fiabilidade do Índice IA_MetroBus (6 itens iniciais)

	Correlação Item- Total Corrigida	Alfa de Cronbach se Item Removido
PERCEP_MB_taobomMT_num	.503	.244
NEGATIVO Necessário	-.416	.672
PERCEP_MB_vou_utilizar_num	.392	.314
PERCEP_MB_concordo_implement_num	.625	.170
NEGATIVO melhor no trajeto	.169	.439
Prob_usar_MB_num	.265	.379

Nota: As variáveis incluídas no índice representam diferentes dimensões da aceitação do Metrobus a hidrogénio. Em particular, a variável “PERCEP_MB_taobomMT_num” corresponde à percepção de que o Metrobus oferecerá um serviço tão bom quanto o Metro do Porto; “NEGATIVO Necessário” expressa a ideia de que a introdução do Metrobus não é necessária porque o sistema atual já é suficiente; “PERCEP_MB_vou_utilizar_num” indica a disposição para utilizar o Metrobus quando estiver disponível; “PERCEP_MB_concordo_implement_num” traduz o grau de concordância com a implementação desta nova tecnologia no sistema de transporte público do Porto; “NEGATIVO melhor no trajeto” reflete a percepção de que o Metrobus não é a melhor opção para o troço em causa face a alternativas superiores, como o prolongamento do Metro; e “Prob_usar_MB_num” capta a probabilidade de utilização frequente do novo serviço assumindo características semelhantes às do Metro atual. A baixa ou negativa correlação dos itens formulados de forma negativa justifica a sua remoção para melhorar a fiabilidade do índice (Fonte: Elaboração própria).

Tabela 23 - Resultados do Teste t para Amostras Emparelhadas: IA_Metro vs. IA_MetroBus

Par	Diferença média	Desvio padrão	IC 95%	t	df	p bilateral
IA_Metro – IA_Metrobus	2,23	25,03	[-2,74;7,20]	0,891	99	0,375

Nota: Dados baseados na comparação dos índices de aceitação normalizados (0-100). (Fonte: Elaboração própria).

Os resultados demonstram que, apesar de o IA_Metro ser 2,23 pontos superior em média, esta diferença não é estatisticamente significativa ($t(99)=0.891$, $p=.375$). O p-valor de 0,375 indica que existe uma probabilidade de 37,5% de observar tal diferença por mero acaso, assumindo que não existe diferença real na população. Adicionalmente, o tamanho do efeito foi negligenciável ($d\approx 0.09$). Não existe, portanto, evidência estatística para afirmar que um sistema tenha uma aceitação geral superior ao outro. Os respondentes não demonstraram uma preferência significativa em termos de aceitação global percebida.

4.4.6. Análise do Benefício Social Percebido (IBS)

Para aprofundar a análise para além da aceitação, foram criados dois Índices de Benefício Social Percebido (IBS), focados em externalidades e impactos coletivos.

1. IBS_LRT (Metro): Inclui itens de ambiente, acessibilidade, segurança e pontualidade. A consistência interna foi de $\alpha=.676$, valor limítrofe, mas aceitável para escalas curtas e multidimensionais.
2. IBS_BRT (Metrobus): Inclui itens sobre sustentabilidade, benefícios económicos, acessibilidade, segurança, inovação e adequação da solução para o trajeto. A consistência interna foi boa, com $\alpha=.790$.

A comparação destes dois índices através de um teste t para amostras emparelhadas revelou um resultado distinto do encontrado na análise da aceitação.

Tabela 24 - Comparação Emparelhada dos Índices de Benefício Social Percebido (IBS)

Comparação	Diferença média	IC95%	t(99)	p (bilateral)	d de Cohen
IBS_LRT – IBS_BRT	5.90	[1.31; 10.49]	2,55	.012	≈ 0.26

Fonte: Elaboração própria.

A análise mostra que o benefício social percebido do Metro do Porto (IBS_LRT) é, em média, 5,90 pontos superior ao do Metrobus (IBS_BRT), numa escala de 0 a 100. Esta diferença é estatisticamente significativa ($t(99)=2.55$, $p=.012$), uma vez que o p-valor é inferior ao nível de significância de 0,05. O intervalo de confiança de 95% para a diferença [1,31; 10,49] não contém o zero, reforçando a significância estatística do resultado.

A magnitude da diferença, avaliada pelo d de Cohen, corresponde a um efeito de tamanho pequeno ($d\approx 0.26$). Isto significa que, embora a diferença seja real e não fruto do acaso, a sua magnitude prática é modesta.

4.4.7. Discussão da Sustentabilidade Social

A hipótese central (H3) postulava que o LRT (Metro) geraria um impacto social mais positivo que o BRT (Metrobus). Os resultados oferecem uma resposta matizada, levando a uma validação parcial da hipótese.

1. Impacto Social Positivo: A análise dos Índices de Benefício Social Percebido (IBS) suporta esta parte da hipótese. O IBS do Metro foi estatisticamente superior ao do Metrobus, indicando que os utentes, em média, percecionam que o sistema de metro tradicional gera maiores benefícios coletivos em dimensões como ambiente e pontualidade.
2. Aceitação e Confiança Tecnológica: A análise dos Índices de Aceitação (IA) não suporta a ideia de uma superioridade do Metro. Não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa na aceitação geral entre os dois sistemas. Isto sugere que, em termos de predisposição para o uso e satisfação geral, o Metrobus a hidrogénio parte de um patamar de aceitação equivalente ao do Metro já consolidado.
3. Familiaridade com a Tecnologia: A hipótese sugeria que a aceitação do BRT dependeria da familiaridade. Embora não testado diretamente, o facto de o Metrobus ser percebido como significativamente mais inovador sugere que a novidade tecnológica é um fator distintivo, mas não parece ter impactado negativamente a sua aceitação inicial, que se mostrou equiparada à do Metro.

Em suma, a evidência aponta que, embora a aceitação geral seja semelhante para ambos os sistemas, o Metro do Porto é percebido como portador de um maior benefício social. A hipótese H3 é, portanto, parcialmente confirmada.

5. Conclusão

A presente dissertação propôs-se a realizar uma análise comparativa multidimensional entre dois sistemas de transporte público para a cidade do Porto: o *Light Rail Transit*, consolidado através do Metro do Porto, e o emergente *Bus Rapid Transit* denominado de Metrobus do Porto. Através da avaliação dos pilares da sustentabilidade — económico, ambiental e social — o estudo procurou determinar qual dos sistemas apresenta um perfil mais vantajoso para o futuro da mobilidade urbana na região. A análise culmina agora na síntese dos principais resultados, na resposta às questões de investigação e na reflexão sobre as implicações e limitações deste trabalho.

5.1 Síntese dos Principais Resultados

A análise comparativa gerou conclusões distintas para cada uma das dimensões avaliadas, pintando um quadro complexo sobre a superioridade de cada sistema.

Na dimensão económica, a análise do Custo Total de Propriedade revelou que, embora o BRT apresente um custo de ciclo de vida nominal inferior ao do LRT a hidrogénio (98,86 M€ vs. 168,34 M€ num horizonte de 30 anos), para o trajeto definido, a sua eficiência económica é manifestamente inferior quando ponderada pela capacidade de transporte. O custo por passageiro-capacidade do LRT (0,13 €) é aproximadamente 46% inferior ao do BRT (0,24 €). Este resultado refuta a Hipótese 1 (H1) na sua forma original, demonstrando que o LRT, apesar do maior investimento inicial, é a solução economicamente mais eficiente para corredores de elevada procura, capitalizando a sua superior capacidade e economias de escala.

Na dimensão ambiental, a análise de emissões de GEE confirmou a Hipótese 2 (H2), mas com uma observação crucial: a fonte de energia é o fator determinante. O BRT a hidrogénio verde demonstrou um desempenho superior ao LRT alimentado pelo atual *mix* elétrico da rede. Contudo, num cenário em que o LRT é alimentado por eletricidade 100% renovável (fotovoltaica), este torna-se inequivocamente a opção com menor pegada de carbono, emitindo apenas 1 gCO₂e/pax-km em lotação elevada, contra 2 gCO₂e/pax-km do BRT. A conclusão central é que a descarbonização da fonte de energia é mais impactante do que a tecnologia de tração em si, e que um sistema ferroviário eletrificado e abastecido por fontes limpas representa o pináculo da sustentabilidade ambiental no transporte.

Finalmente, na dimensão social, a análise dos dados do inquérito validou parcialmente a Hipótese 3 (H3). Verificou-se que não existe uma diferença estatisticamente significativa na

aceitação geral entre os dois sistemas; o Metrobus a hidrogénio, percebido como mais inovador, parte de um patamar de expectativa e intenção de uso equiparável ao do Metro do Porto. No entanto, o Metro do Porto obteve uma pontuação significativamente superior no Índice de Benefício Social Percebido, indicando que os cidadãos o associam a maiores vantagens coletivas em termos de impacto ambiental, pontualidade e estruturação urbana. Assim, embora a novidade tecnológica do BRT seja atrativa, o LRT mantém uma imagem de maior robustez e benefício para a comunidade.

5.2 Implicações para a Política de Mobilidade

Os resultados deste estudo oferecem várias implicações para os decisores políticos e planeadores urbanos no Porto e noutras cidades. Primeiro, a decisão entre LRT e BRT não deve ser baseada apenas no custo de investimento inicial (CAPEX). A análise de TCO por capacidade demonstra que, para corredores estratégicos e de média/alta densidade, o investimento num sistema de maior capacidade como o LRT pode gerar um retorno socioeconómico superior a longo prazo. Importa sublinhar que, em transportes públicos, o que aparenta ser a opção mais barata no curto prazo pode não ser a mais eficiente nem a mais sustentável no longo prazo. Mesmo com o apoio de fundos europeus, é essencial que as decisões de investimento sejam acompanhadas de planeamento rigoroso, tendo em vista não apenas a procura atual, mas também as necessidades de mobilidade futura, de modo a evitar soluções subdimensionadas e custos acrescidos de expansão.

A opção pelo BRT pode ser mais adequada para eixos de baixa procura ou como uma solução mais flexível para expandir a rede de transporte público e servir de apoio a uma rede central de metro ligeiro. Segundo, o potencial ambiental de qualquer sistema de transporte elétrico (seja a baterias ou a hidrogénio) só é plenamente realizado com a descarbonização da rede elétrica ou com a produção dedicada de energia renovável. Investir em frotas de "zero emissões" sem garantir uma fonte de energia limpa é uma solução incompleta. As políticas de mobilidade devem, por isso, estar intrinsecamente ligadas às políticas energéticas. Terceiro, a perceção pública é um fator complexo. A inovação tecnológica (hidrogénio) gera curiosidade e aceitação, mas a confiança e a perceção do benefício social continuam associadas a sistemas mais estabelecidos e estruturantes como o metro ligeiro. A comunicação dos benefícios do novo sistema BRT será, por isso, fundamental para garantir

a sua integração bem-sucedida no imaginário coletivo e nos padrões de mobilidade dos cidadãos.

5.3 Limitações do Estudo e Sugestões para Investigação Futura

Este estudo, como qualquer investigação, possui limitações que devem ser reconhecidas. A análise de custos e emissões baseou-se em estimativas e dados de projetos-piloto internacionais, dada a ausência de dados operacionais do Metrobus do Porto. A monitorização *ex-post* do sistema, quando este estiver em pleno funcionamento, será crucial para validar ou refinar os resultados aqui apresentados. Adicionalmente, a análise social foi conduzida com uma amostra não-probabilística, o que limita a generalização dos resultados a toda a população da Área Metropolitana do Porto.

Para investigação futura, sugere-se a expansão da análise para incluir outros impactos, como a poluição sonora, o impacto na sinistralidade rodoviária e a valorização imobiliária ao longo dos corredores. Seria igualmente valioso realizar uma análise de custo-benefício social completa, que monetize as externalidades positivas e negativas de cada sistema. Por fim, estudos longitudinais que acompanhem a evolução da perceção pública antes, durante e após a implementação do Metrobus poderão oferecer *insights* preciosos sobre os processos de adoção de novas tecnologias de mobilidade.

Em suma, esta tese conclui que não existe uma resposta única para a questão de qual é o "melhor" sistema. A escolha ótima depende do contexto, da procura do corredor, dos objetivos políticos e da maturidade tecnológica. O LRT afirma-se como a solução superior em termos de eficiência económica por capacidade e potencial ambiental máximo, enquanto o BRT a hidrogénio surge como uma alternativa inovadora e competitiva, especialmente se o investimento em infraestrutura ferroviária for um constrangimento. O futuro da mobilidade sustentável no Porto passará, muito provavelmente, pela coexistência inteligente e integrada de ambos os sistemas.

6. Bibliografia

- Abdullahi, U. O., & Adnan, A. (2024). Sustainable urban mobility: Lessons from European cities. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 21(2), 157-170. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.21.2.0210>
- Ackrill, R., & Zhang, M. (2020). Sustainable mobility – Editorial introduction. *Sustainable Mobility*, 1(1), 1-6. <https://doi.org/10.2478/susmo-2020-0001>
- Acton, B., Le, H. T. K., & Miller, H. J. (2022). Impacts of bus rapid transit (BRT) on residential property values: A comparative analysis of 11 US BRT systems. *Journal of Transport Geography*, 100, Article 103324. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103324>
- Aderibigbe, O.-O., & Olajide, S. O. (2023). Users' perception on sustainability of Bus Rapid Transit (BRT) system in Lagos Metropolis Nigeria. *Srusti Management Review*, 16(1), 70-84. <https://hdl.handle.net/10210/504618>
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10049-10058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>
- Allansson, J., Pettersson, F., & Hrelja, R. (2023). Collaborative challenges and barriers when planning and implementing bus rapid transit (BRT): Lessons from Swedish BRT projects. *Urban, Planning and Transport Research: An Open Access Journal*, 11(1), Article 2246530. <https://doi.org/10.1080/21650020.2023.2246530>
- Ally, J., & Pryor, T. (2016). Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study. *Energy Policy*, 94, 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.039>
- Alstom, & Carbone 4. (2022). *Tramways or BRTs: Lifecycle analysis*. https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2022/09/14/Alstom_Carbone_4_Tramways_or_BRTs_lifecycle_analysis_EN.pdf
- Amani, M. J. (2025). Urban sustainability through pavement technologies: Reducing urban heat islands with cool pavements. *Buildings*, 15(3), 504. <https://doi.org/10.3390/buildings15030504>
- Aminudin, M. A., Kamarudin, S. K., Lim, B. H., Majilan, E. H., Masdar, M. S., & Shaari, N. (2023). An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(11), 4371-4388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.156>
- Automóvel Club de Portugal. (2025, February 20). *Vem aí o primeiro MetroBus a hidrogénio para a Metro do Porto*. <https://www.acp.pt/o-clube/revista-acp/atualidade/detalhe/vem-ai-o-primeiro-metrobus-a-hidrogenio-para-a-metro-do-porto>

- Autoridade da Mobilidade e dos Transportes. (2021). *Relatório dos sistemas de metro 2018-2020*. https://www.amt-autoridade.pt/media/3324/relatorio_dos_sistemas_de_metro_2018-2020.pdf
- Boarnet, M. G., Wang, X., & Houston, D. (2017). Can new light rail reduce personal vehicle carbon emissions? A before-after, experimental-control evaluation in Los Angeles. *Journal of Regional Science*, 57(3), 523-539. <https://doi.org/10.1111/jors.12275>
- Boray, T., Hegazi, M., Busche, H., & Lovegrove, G. (2024). The economic feasibility of (re-)introducing tram-trains in Canada: Okanagan Valley electric regional passenger rail. *Sustainability*, 16(10), 4081. <https://doi.org/10.3390/su16104081>
- Borghetti, F., Longo, M., Bonera, M., Libretti, M., Somaschini, C., Martinelli, V., Medeghini, M., & Mazzoncini, R. (2023). Battery Electric Buses or Fuel Cell Electric Buses? A Decarbonization Case Study in the City of Brescia, Italy. *Infrastructures*, 8(12), 178. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8120178>
- Boudreaux, D. J., & Meiners, R. E. (2019). Externality: Origins and classifications. *Natural Resources Journal*, 59(1), 1-34. <https://www.jstor.org/stable/26617802>
- BRT+ Centre of Excellence, & WRI Brasil Ross Center for Sustainable Cities. (2023, August). *Global BRTData* (Version 3.66) [Data set]. Retrieved July 31, 2025, from <http://brtdata.org/>
- CaetanoBus. (2023). *H2.City Gold* [Brochure]. <https://caetanobus.pt/wp-content/uploads/2023/05/H2.City-Gold.pdf>
- Cervero, R. (2013). *Bus rapid transit (BRT): An efficient and competitive mode of public transport* (Working Paper No. 2013-01). University of California, Institute of Urban and Regional Development. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/92378/1/769755348.pdf>
- Chakrabarti, S., & Giuliano, G. (2016). Using regional archived multimodal transportation system data for policy analysis: A case study of the LA Metro Expo Line. *Journal of Planning Education and Research*, 36(2), 195-209. <https://doi.org/10.1177/0739456X15604444>
- Ciancetta, F., Di Pasquale, M., D'Ovidio, G., Fabri, G., Ometto, A., Ranieri, S., & Villante, C. (2023). Performance simulation of hydrogen-electric transit bus running in a mountain environment. *European Transport / Trasporti Europei*, 90, Paper 9, 1-10. <https://doi.org/10.48295/ET.2023.90.9>
- Clean Hydrogen Joint Undertaking. (2022). *Programme review report 2022*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2843/656001>
- Coppitters, D., Verleysen, K., De Paepe, W., & Contino, F. (2022). How can renewable hydrogen compete with diesel in public transport? Robust design optimization of a hydrogen refueling station under techno-economic and environmental uncertainty. *Applied Energy*, 312, Article 118694. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118694>

- Deloitte, & Ballard Power Systems. (2020). *Volume 1: Powering the future of mobility*. <https://info.ballard.com/hubfs/Other%20Reports/Deloitte%20Volume%201%20Powering%20the%20Future%20of%20Mobility.pdf>
- Di Vece, G., Di Nunno, D., Bilancia, M., & Verdino, V. (2022). *Development of a total cost of ownership model to compare BEVs, FCEVs and diesel powertrains on bus applications* (SAE Technical Paper 2022-37-0030). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2022-37-0030>
- Diário da República. (2025, May 2). *Resolução do Conselho de Ministros n.º 95/2025 — Linha BRT Boavista-Império (envelope 76 M€)*. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/95-2025-916457172>
- Diário de Notícias. (2019, June 17). *Contas da Metro do Porto relativas a 2018 aprovadas por unanimidade*. <https://www.dn.pt/arquivo/diario-de-noticias/contas-da-metro-do-porto-relativas-a-2018-aprovadas-por-unanimidade-11017327.html>
- Dziauddin, M. F. (2019). Estimating land value uplift around light rail transit stations in Greater Kuala Lumpur: An empirical study based on geographically weighted regression (GWR). *Research in Transportation Economics*, 74, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.01.003>
- Dziauddin, M. F. (2021). The impact of urban light rail transit on double-story terraced property values in the Greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Indonesian Journal of Geography*, 53(1), 61-66. <https://doi.org/10.22146/ijg.46302>
- ENGIE Solutions. (2020, November 4). *Production Énergie Pau Fébus* [Press release]. https://www.engie-solutions.com/sites/default/files/assets/2020-11/2020.11.04%20CPES%20-%20ProductionEnergiePauF%C3%A9bus%20VDEF_EN.pdf
- Estrada Poggio, A., Balest, J., Zubaryeva, A., & Sparber, W. (2023). Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas. *Journal of Energy Storage*, 72, Article 108411. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108411>
- European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, CE Delft, INFRAS, & Ricardo. (2020). *Handbook on the external costs of transport: Version 2019 (1.1)* (Publication code 18.4K83.131; ISBN 978-92-76-18184-2). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2832/51388>
- European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *Electric Bus Rapid Transit: high capacity Bus with zero local emissions* (LIFE BeeBus LIFE13 ENV/FR/000281) [Project record]. TRIMIS. Retrieved July 31, 2025, from <https://trimis.ec.europa.eu/project/electric-bus-rapid-transit-high-capacity-bus-zero-local-emissions>

- European Commission. (2023). *Portugal: 2023 climate action progress factsheet*. https://climate.ec.europa.eu/document/download/4d9b8bad-5c62-434a-825a-963036caf2d3_en?filename=pt_2023_factsheet_en.pdf
- European Committee for Standardization. (2012). *EN 16258:2012. Methodology for calculation and declaration of energy consumption and greenhouse gas emissions of transport services (freight and passengers)*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/e9512863-2632-47df-b6cf-648d725a01e3/en-16258-2012>
- European Environment Agency. (2014). *Monitoring CO₂ emissions from passenger cars and vans in 2013* (EEA Technical report No 19/2014). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/233523>
- European Metropolitan Transport Authorities. (2021). *Light rail report*. https://www.emta.com/wp-content/uploads/2021/12/light_rail_report.pdf
- European Parliament, & Council of the European Union. (2023, July 12). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and repealing Regulation (EU) No 2019/1020. *Official Journal of the European Union*, L 191, 1-114. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>
- Fageda, X. (2021). Do light rail systems reduce traffic externalities? Empirical evidence from mid-size European cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102731. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102731>
- Federal Transit Administration. (2016, October 26). *Default useful life benchmark (ULB) cheat sheet*. U.S. Department of Transportation. <https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/docs/FTA%20TAM%20ULB%20Cheat%20Sheet%202016-10-26.pdf>
- Fischer, H., & Zenith, F. (2020, January 31). *Business case for operators of hydrogen city buses* (Deliverable D7.6, GIANTLEAP Project, Grant Agreement No. 700101). European Commission. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cba4a794&appId=PPGMS>
- Gallo, M., & Marinelli, M. (2020). Sustainable mobility: A review of possible actions and policies. *Sustainability*, 12(18), 7499. <https://doi.org/10.3390/su12187499>
- García, A., Monsalve-Serrano, J., Lago Sari, R., & Tripathi, S. (2022). Life cycle CO₂ footprint reduction comparison of hybrid and electric buses for bus transit networks. *Applied Energy*, 308, Article 118354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118354>
- Grande-Ayala, C. E., & Navas-Gracias, L. M. (2025). Institutional features driving socially sustainable urban mobility: Contributions from the Northern Central American Triangle. *Cities*, 160, Article 105807. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.105807>

- Guedes de Paiva, F. F., Elias, A. B. M., Pires, A. C. W., Breda, M. E., & Ponciano, N. R. (2024). Challenges and solutions for sustainable urban mobility: Lessons from Amsterdam and Curitiba. *MIX Sustentável*, 10(5), 221-231. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2024.v10.n5.221-231>
- Gulcimen, S., Aydogan, E. K., & Uzal, N. (2021). Life cycle sustainability assessment of a light rail transit system: Integration of environmental, economic, and social impacts. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(5), 1070-1082. <https://doi.org/10.1002/ieam.4428>
- Gunawan, F. E. (2021). The fuel consumption density due to phantom traffic jam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 729(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012025>
- Guo, H., Zhao, L., Zang, S., & Wei, Y. (2024). Calculation of greenhouse gas emissions of urban rail transit systems in China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -- Engineering Sustainability*, 177(4), 209-216. <https://doi.org/10.1680/jensu.23.00001>
- Hausberger, S., Marschnig, S., & Knabl, D. (2023). In-depth lifecycle assessment of ballasted railway track and slab track considering varying subsoil conditions. *Sustainability*, 15(17), 12974. <https://doi.org/10.3390/su151712974>
- Hidalgo, D., & Gutiérrez, L. (2013). BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.018>
- Hidalgo, D., & Muñoz, J. C. (2015). Bus rapid transit and buses with high level of service: A global overview. In R. Hickman, M. Givoni, D. Bonilla, & D. Banister (Eds.), *Handbook on transport and development* (pp. 346-362). Edward Elgar. <https://doi.org/10.4337/9780857937261.00030>
- Hidalgo, D., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2024). Bus Rapid Transit: End of trend in Latin America? *Data and Policy*, 6, Article e2. <https://doi.org/10.1017/dap.2023.44>
- Hoonsiri, C., Chiarakorn, S., & Kiattikomol, V. (2021). Using Combined Bus Rapid Transit and Buses in a Dedicated Bus Lane to Enhance Urban Transportation Sustainability. *Sustainability*, 13(6), 3052. <https://doi.org/10.3390/su13063052>
- Ibraeva, A., Van Wee, B., Correia, G. H. de A., & Pais Antunes, A. (2021). Longitudinal macro-analysis of car-use changes resulting from a TOD-type project: The case of Metro do Porto (Portugal). *Journal of Transport Geography*, 92, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103036>
- Institute for Transportation and Development Policy. (n.d.). *The BRT planning guide*. Retrieved January 4, 2025, from <https://brtguide.itdp.org/>
- International Association of Public Transport. (n.d.). *Bus Rapid Transit*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.uitp.org/topics/bus-rapid-transit/>

- International Council on Clean Transportation. (2021). *Pathways to decarbonization: The European passenger car market in the years 2021-2035* [White paper]. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/decarbonize-EU-PVs-may2021.pdf>
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. (2022). *Fact sheet: IEA PVPS T12-23 LCA update 2022*. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/11/Fact-Sheet-IEA-PVPS-T12-23-LCA-update-2022.pdf>
- International Energy Agency. (2019). *The future of rail: Opportunities for energy and the environment*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/fb7dc9e4-d5ff-4a22-ac07-ef3ca73ac680/The_Future_of_Rail.pdf
- International Energy Agency. (2022). *Global hydrogen review 2022*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., Manzano, J., & Dufour, J. (2016). Assessing the social acceptance of hydrogen for transportation in Spain: An unintentional focus on target population for a potential hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(10), 5203-5208. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.139>
- Jagiello, A. (2017). The role of the Bus Rapid Transit in public transport. *Transportation Overview - Przegląd Komunikacyjny*, (2), 1-9. https://doi.org/10.35117/a_eng_17_02_01
- Kebede, A. B., & Worku, G. B. (2021). A research on regenerative braking energy recovery: A case of Addis Ababa light rail transit. *eTransportation*, 8, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100117>
- Kim, H., Hartmann, N., Zeller, M., Luise, R., & Soylu, T. (2021). Comparative TCO analysis of battery electric and hydrogen fuel cell buses for public transport system in small to midsize cities. *Energies*, 14(14), Article 4384. <https://doi.org/10.3390/en14144384>
- King, R. (2013, December 10). *4 ways cities benefit from bus rapid transit (BRT)*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/4-ways-cities-benefit-bus-rapid-transit-brt>
- Knowles, R. D., & Ferbrache, F. (2016). Evaluation of wider economic impacts of light rail investment on cities. *Journal of Transport Geography*, 54, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.09.002>
- Kołodziejski, M., Matuszak, Z., & Żabińska, I. (2022). Possibilities of using hydrogen buses in urban transport. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 161, 53-64. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2022.161.4>

- Kotowicz, J., Baszcieńska, O., & Niesporek, K. (2024). Cost of green hydrogen. *Energies*, 17(18), 4651. <https://doi.org/10.3390/en17184651>
- Krebs, E. (2022, August 4). *Europe's new trams are reviving a golden age of transit*. Reasons to be Cheerful. <https://reasonstobecheerful.world/europe-tram-systems-revival/>
- Kuyumcu, A. M., Bingül, B., Akar, F., & Yıldız, A. (2024). Well-to-wheel carbon footprint and cost analysis of gasoline, diesel, hydrogen ICE, hybrid and fully electric city buses. *Energy*, 301, Article 131685. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131685>
- Kwolek, R. (2024, November 12). *Cheaper better trams*. Create Streets. <https://www.createstreets.com/cheaper-better-trams/>
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Levine, J., Singer, M., Merlin, L., & Grengs, J. (2018). Apples to apples: Comparing BRT and light rail while avoiding the "BRT-Lite" trap. *Transport Policy*, 69, 20-34. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.015>
- Levinson, H. S., Zimmerman, S., Clinger, J., & Harris, D. M. (2002). Bus Rapid Transit: An Overview. *Journal of Public Transportation*, 5(2), 1-30. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.5.2.1>
- Lin, N., Arzumanyan, M., Rodriguez Calzado, E., & Nicot, J.-P. (2025). Water requirements for hydrogen production: Assessing future demand and impacts on Texas water resources. *Sustainability*, 17(2), 385. <https://doi.org/10.3390/su17020385>
- Lozanovski, A., Whitehouse, N., Ko, N., & Whitehouse, S. (2018). Sustainability assessment of fuel cell buses in public transport. *Sustainability*, 10(5), Article 1480. <https://doi.org/10.3390/su10051480>
- Major, Z., Szigeti, C., & Czédli, H. M. (2023). "Green" tram tracks for the sustainability of the urban environment. *Chemical Engineering Transactions*, 107, 289-294. <https://doi.org/10.3303/CET23107049>
- Malek, A., Taccani, R., Kasperek, D., & Hunicz, J. (2021). Optimization of energy management in a city bus powered by the hydrogen fuel cells. *Komunikácie -- vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*, 23(4), 56-67. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.4.E56-E67>
- Marzolla, F., Bruno, M., Melo, H. P. M., & Loreto, V. (2024, September 3). *Compact 15-minute cities are greener* (arXiv:2409.01817) [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01817>
- Metro do Porto. (2020). *Relatório de Sustentabilidade 2020*. https://www.metroporto.pt/uploads/document/file/674/Relatorio_de_Sustentabilidade_2020.pdf

- Metro do Porto. (2022). *Relatório de Sustentabilidade 2019-2021*. https://www.metrodoporto.pt/metrodoporto/uploads/document/file/615/relatorio_de_sustentabilidade_2019_2021.pdf
- Metro do Porto. (2022, January 24). *Linha BRT Boavista-Ímpério será adjudicada por €24.963.701,62*. https://www.metrodoporto.pt/pages/699?news_id=410
- Metro do Porto. (2023, October 19). *Consórcio português fornece veículos para o metroBus (29,5 M€, 5 anos de manutenção)*. https://www.metrodoporto.pt/pages/771?news_id=489
- Metro do Porto. (2024). *metroBus: Um projeto de mobilidade Metro do Porto* [Presentation]. https://www.metrodoporto.pt/metrodoporto/uploads/writer_file/document/577/ppt_metrobus_2024.pdf
- Metro do Porto. (2025). *Metro do Porto adjudica 22 novas unidades CRRC para a Linha Rubi (H)*. https://www.metrodoporto.pt/pages/834?news_id=551
- Metro do Porto. (2025, February 11). *Mais um recorde de validações: 89,78 milhões em 2024!* https://www.metrodoporto.pt/pages/630?news_id=548
- Metro do Porto. (n.d.). *Frota*. Retrieved August 11, 2025, from <https://www.metrodoporto.pt/pages/341>
- Migliarese Caputi, M. V., Coccia, R., Venturini, P., Cedola, L., & Borello, D. (2022). Assessment of hydrogen and LNG buses adoption as sustainable alternatives to diesel fuel buses in public transportation: Applications to Italian perspective. *E3S Web of Conferences*, 334, 09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233409002>
- Moraglio, M., & Kopper, C. (Eds.). (2015). *The organization of transport: A history of users, industry, and public policy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315813141>
- Nantes Métropole. (2019, December). *E-Busway* [Fact sheet]. French Ministry for Housing and Territorial Cohesion, EcoCité initiative. https://www.ecocites.logement.gouv.fr/IMG/pdf/ecocite_fiches_top_10_2019_nantes_metropole_ebus_pia_bat_en.pdf
- Nastasi, B., & Lo Basso, G. (2016). Hydrogen to link heat and electricity in the transition towards future smart energy systems. *Energy*, 110, 5-22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.097>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2009). *Track maintenance costs on rail transit properties* (TCRP Web-Only Document No. 43). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23033>
- Nguyen, H. N., Sua, T. S., & Nguyen, M. H. (2020). Evaluating the maiden BRT corridor in Vietnam. *Transport and Communications Science Journal*, 71(4), 336-346. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.4.3>

- Osman, A. I., Nasr, M., Mohamed, A. R., Abdelhaleem, A., Ayati, A., Farghali, M., Al-Muhtaseb, A. H., Al-Fatesh, A. S., & Rooney, D. W. (2024). Life cycle assessment of hydrogen production, storage, and utilization toward sustainability. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 13(3), Article e526. <https://doi.org/10.1002/wene.526>
- Patel, G. H., Havukainen, J., Horttanainen, M., Soukka, R., & Tuomaala, M. (2024). Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment. *Green Chemistry*, 26, 992-1006. <https://doi.org/10.1039/D3GC02410E>
- Pine, R., Niemeyer, J., & Chisholm, R. (1998). *Transit scheduling: Basic and advanced manuals (Part B)* (TCRP Report No. 30). Transportation Research Board, National Research Council. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_30-b.pdf
- Pinho, P., & Vilares, M. (2009). *A Avaliação das Grandes Obras Públicas: o caso do Metro do Porto*. FEUP Edições. <https://books.fe.up.pt/index.php/feuped/catalog/book/1>
- Porto Canal. (2025, June 12). *STCP propõe metrobus na rotunda da Boavista pois inversão de marcha é "inviável"*. <https://portocanal.sapo.pt/noticia/364451>
- Post, M. B., & Collins, E. (2023, June 7). *Fuel cell bus evaluations* (NREL/PR-5700-85826). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/85826.pdf>
- Procter, A., Bassi, A., Kolling, J., Cox, L., Flanders, N., Tanners, N., & Araujo, R. (2017). The effectiveness of light rail transit in achieving regional CO₂ emissions targets is linked to building energy use: Insights from system dynamics modeling. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(5), 1459-1474. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1343-z>
- Quarton, C. J., Tlili, O., Welder, L., Mansilla, C., Blanco, H., Heinrichs, H., Leaver, J., Samsatli, N. J., Lucchese, P., Robinius, M., & Samsatli, S. (2020). The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. *Sustainable Energy & Fuels*, 4, 80-95. <https://doi.org/10.1039/c9se00833k>
- Randall, C. (2019, May 18). *43 electric buses running in French Amiens*. electrive.com. <https://www.electrive.com/2019/05/18/amiens-receives-a-43-bus-strong-electric-fleet/>
- Ravensbergen, L., Wasfi, R., Van Liefferinge, M., Ehrlich, I., Prince, S. A., Butler, G., Kestens, Y., & El-Geneidy, A. (2023). Associations between Light Rail Transit and physical activity: A systematic review. *Transport Reviews*, 43(2), 234-263. <https://doi.org/10.1080/01441647.2022.2099999>
- Reis, C. M. A. dos. (2010). *O impacto do Metro do Porto na valorização imobiliária* [Master's thesis, Faculdade de Economia da Universidade do Porto]. Repositório Aberto da Universidade do Porto. <http://hdl.handle.net/10216/57373>

- REN – Redes Energéticas Nacionais. (2025, January 6). *Recorde de produção de renováveis abastece 71% do consumo de eletricidade em 2024*. <https://www.ren.pt/pt-pt/media/noticias/recorde-de-producao-de-renovaveis-abastece-71-do-consumo-de-eletricidade-em-2024>
- Ritchie, H., & Rosado, P. (2025, March 31). *Air pollution kills millions every year — where does it come from?* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/air-pollution-sources>
- Rupprecht Consult GmbH. (n.d.). *EBRT 2030*. Retrieved July 31, 2025, from <https://www.rupprecht-consult.eu/project/ebrt-2030>
- Sadik-Zada, E. R., Santibanez Gonzalez, E. D. R., Gatto, A., Althaus, T., & Quliyev, F. (2023). Pathways to the hydrogen mobility futures in German public transportation: A scenario analysis. *Renewable Energy*, 205, 384-392. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.087>
- Scheepmaker, G. M., Pudney, P. J., Albrecht, A. R., Goverde, R. M. P., & Howlett, P. G. (2020). Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 14, Article 100180. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100180>
- Schroten, A., van Wijngaarden, L., Brambilla, M., Gatto, M., & Maffii, S. (2019). *Overview of transport infrastructure expenditures and costs* (Report No. 18.4K83.134). European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/62891fd3-c3fb-11e9-9d01-01aa75ed71a1>
- Senior, M. L. (2009). Impacts on travel behaviour of Greater Manchester's light rail investment (Metrolink Phase 1): Evidence from household surveys and Census data. *Journal of Transport Geography*, 17(3), 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.11.004>
- Souza Junior, C. M. de. (2014). *A tecnologia VLT como alternativa na mobilidade urbana: O caso da Avenida Norte Miguel Arraes de Alencar* [Undergraduate thesis, Universidade Federal de Pernambuco]. Repositório Institucional UFPE. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45736>
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>
- Sustainable Bus. (2019, December 18). *Pau (France) welcomes the launch of the world's first hydrogen BRT*. <https://www.sustainable-bus.com/news/pau-welcomes-the-launch-of-the-worlds-first-hydrogen-brt/>
- Teodorovic, D., & Janic, M. (2022). Transportation, environment, and society. In *Transportation engineering: Theory, practice, and modeling* (2nd ed., Chapter 11). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90813-9.00011-4>

- Terlouw, T., Rosa, L., Bauer, C., & McKenna, R. (2024). Future hydrogen economies imply environmental trade-offs and a supply-demand mismatch. *Nature Communications*, 15, Article 7043. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51251-7>
- Tirachini, A., Hensher, D. A., & Jara-Díaz, S. R. (2010). Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transport network. *Research in Transportation Economics*, 29(1), 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.07.029>
- Tramways & Urban Transit. (2019, November 5). *France welcomes its 24th modern tramway — and in less than 35 years*. <https://www.tautonline.com/france-welcomes-24th-modern-tramway-less-35-years/>
- Urban Rail Platform. (2023). *Urban rail transport: Definition by the Urban Rail Platform*. International Association of Public Transport. https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2024/03/202309_URP_definition-of-urban-rail.pdf
- Urban Transport Magazine. (2019, November 19). *Now in service: Route T3 in Nice*. <https://www.urban-transport-magazine.com/en/now-in-service-route-t3-in-nice/>
- Urban Transport Magazine. (2021, April 14). *Paris inaugurates new tram line T9*. <https://www.urban-transport-magazine.com/en/paris-inaugurates-new-tram-line-t9/>
- Valdés Serrano, C., & López Lambas, M. E. (2010). Del BRT al BHLS: Un enfoque europeo de los sistemas de transporte masivo en autobús. *Actas del IX Congreso de Ingeniería del Transporte*. [https://oa.upm.es/6799/2/INVE MEM 2010 74733.pdf](https://oa.upm.es/6799/2/INVE_MEM_2010_74733.pdf)
- Van Hulst, N. (2019, April 23). *The clean hydrogen future has already begun*. International Energy Agency. <https://www.ica.org/commentaries/the-clean-hydrogen-future-has-already-begun>
- Venter, C., Jennings, G., Hidalgo, D., & Valderrama Pineda, A. F. (2018). The equity impacts of bus rapid transit: A review of the evidence and implications for sustainable transport. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(2), 140-152. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1340528>
- Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z., & Cordobes Adroher, X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells: A review. *Materials Today*, 32, 178-203. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

7. Anexos

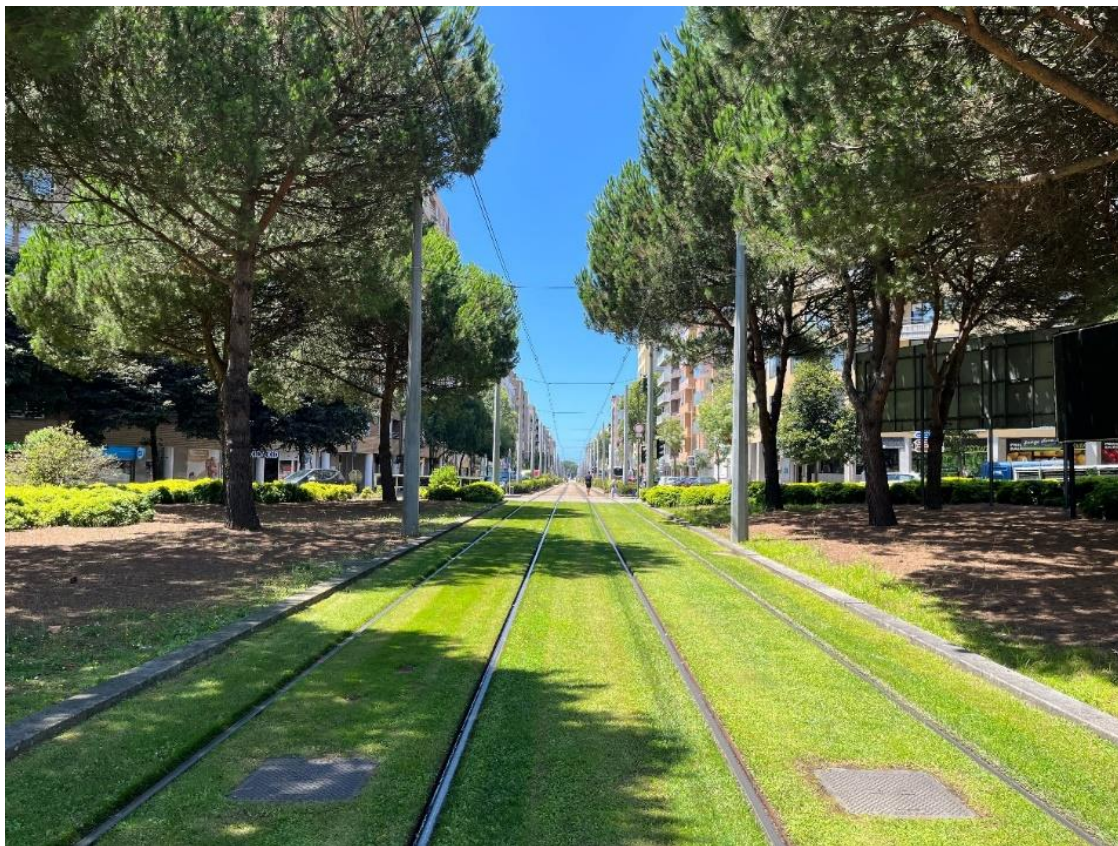


Figura 1 - Corredor LRT Avenida da República, Matosinhos

Fonte: Fotografia de autoria própria.

Tabela 1 - Custo por quilómetro de projetos LRT em Economias em Desenvolvimento

País	Cidade	Projeto	Extensão (km)	Custo por km (USD 2013)
Argélia	Constantine	Constantine Tram	8	\$50.000.000
Argélia	Oran	Oran Tramway	19	\$22.664.421
Brasil	Rio de Janeiro	PPP Port Maravilha Light Rail	28	\$16.071.429
China	Shenyang	Shenyang Tram	60	\$12.900.000
México	Guadalajara	Tren Ligero Línea 3	16	\$31.890.625
Marrocos	Casablanca	Casablanca Tramway	31	\$19.354.839
Marrocos	Rabat	Rabat-Salé Tramway	19	\$24.736.842
Média				\$25.373.992

Fonte Adaptado e traduzido de Institute for Transportation and Development Policy (s.d.)

Tabela 2 - Custo por quilómetro de projetos LRT em Economias Desenvolvidas

País	Cidade	Projeto	Extensão (km)	Custo por km (USD 2013)
França	Paris		14	\$60.714.286
França	Rouen		15	\$45.333.333
França	Besançon	Line 1 Tramway	15	\$19.278.333
França	Dijon	Line 1+2 Tramway	19	\$54.575.760
França	Le Havre	Line 1+2 Tramway	13	\$41.653.077
França	Reims	Line 1 Tramway	11	\$44.188.182
França	Lyon	Line 4 Tramway	16	\$19.397.500
EUA	Charlotte	LYNX Blue Line	16	\$31.445.625
EUA	Charlotte	LYNX Blue Line Extension	16	\$66.856.250
EUA	Minneapolis	Metro Blue Line	20	\$45.145.730
EUA	Sacramento	RT Blue Line Extension	7	\$32.321.429
EUA	Houston	Purple Line/SW Corridor	10	\$16.983.900
Média				\$37.495.032

Fonte: Adaptado e traduzido de Institute for Transportation and Development Policy (s.d.)

Tabela 4 - Custos externos totais em 2016 para o transporte rodoviário, ferroviário e por vias navegáveis interiores (IWT), por país.

País	Rodoviário (mil milhões €)	Ferroviário (mil milhões €)	IWT (mil milhões €)	Total (mil milhões €)	% do PIB
UE 28	820,4	17,87	2,90	841,1	5,7%
Áustria	18,3	0,85	0,044	19,2	5,9%
Bélgica	26,4	0,42	0,183	27,0	7,0%
Bulgária	6,5	0,12	0,047	6,6	6,5%
Croácia	5,0	0,07	0,015	5,1	6,9%
Chipre	1,1	-	-	1,1	5,1%
República Checa	13,6	0,40	0,004	14,0	5,2%
Dinamarca	8,2	0,18	-	8,4	4,1%
Estónia	1,5	0,04	0,014	1,5	5,3%
Finlândia	7,4	0,23	0,073	7,7	4,4%
França	109,1	1,76	0,181	111,0	5,5%
Alemanha	165,7	5,37	1,228	172,3	5,8%
Grécia	12,8	0,06	-	12,8	6,0%
Hungria	11,1	0,43	0,037	11,5	6,0%
Irlanda	14,3	0,06	-	14,4	5,7%
Itália	115,0	2,20	0,009	117,2	6,8%
Letónia	2,3	0,18	-	2,5	6,7%
Lituânia	3,9	0,12	-	4,0	6,3%
Luxemburgo	3,2	0,03	0,009	3,3	7,5%
Malta	0,4	-	-	0,4	3,6%
Países Baixos	29,6	0,35	0,848	30,8	4,9%
Polónia	40,2	1,28	0,018	41,5	5,5%
Portugal	16,8	0,18	-	16,9	7,2%
Roménia	21,2	0,46	0,171	21,8	6,5%

Eslováquia	5,4	0,33	0,012	5,7	4,7%
Eslovénia	2,7	0,05	-	2,7	5,5%
Espanha	64,3	0,83	-	65,1	5,2%
Suécia	15,3	0,46	-	15,8	4,5%
Reino Unido	99,4	1,42	0,009	100,8	4,9%
Noruega	7,4	0,17	-	7,6	3,4%
Suíça	15,3	0,76	0,001	16,1	4,1%

Fonte: Adaptado e traduzido de European Commission, (2020).



Figura 2 - Corredor BRT na Avenida da Boavista, Porto

Fonte: Fotografia de autoria própria