



Análise de sistemas guiados de transporte público em zona urbana

Valdemiro Filipe Ribeiro Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador

Professor Doutor Paulo Manuel da Fonseca Teixeira

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria do Rosário Maurício Ribeiro Macário

Orientador: Professor Doutor Paulo Manuel da Fonseca Teixeira

Vogal: Doutor Vasco Domingos Moreira Lopes Miranda dos Reis

Agosto de 2020

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao professor Paulo Teixeira por me ter acompanhado nesta importante etapa do meu percurso académico, no Instituto Superior Técnico. Foi, sem dúvida, uma ajuda preciosa, uma vez que, procurou sempre que se desenvolvesse um tema para o qual eu estaria interessado, dando-me liberdade para explorá-lo, em simultâneo com um bom e contínuo acompanhamento.

Gostaria também de agradecer à minha família por todo o esforço que fizeram para que conseguisse ter a educação que tenho atualmente.

Quero igualmente agradecer ao Agrupamento de Escuteiros 729 Cascais e a todas as pessoas que pertencem a este movimento e que me ajudaram, e ainda ajudam, a desenvolver-me enquanto pessoa.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que me acompanham ao longo da minha vida pessoal e académica. Eles são a família que eu escolhi e pelo qual estou muito grato de os ter na minha vida.

RESUMO

Nos últimos anos tem-se vivido uma grande evolução no sector dos transportes públicos, tendo surgido alternativas inovadoras que consagram vantagens de vários sistemas de transporte convencionais. Dentro destas alternativas dá-se destaque aos sistemas de transporte que possuem um guiamento não convencional, podendo beneficiar o sector dos transportes públicos, visto que, para uma média baixa procura, podem ser economicamente mais viáveis que um sistema convencional de transporte ferroviário, mantendo um bom desempenho operacional.

A presente dissertação pretende avaliar a potencialidade de implementar sistemas não convencionais de transporte público. Numa primeira etapa, recolheu-se informação sobre os sistemas de transporte convencionais e não convencionais. Em seguimento, utilizou-se um método de análise multicritério, mais concretamente o método ELECTRE, para analisar nove alternativas de sistemas de transporte convencionais e não convencionais, através de treze critérios avaliativos associados ao desempenho do sistema, aos custos associados e aos aspetos ambientais e urbanísticos, para um total de quatro cenários criados com diferentes valores de procura horária (entre 1000 e 4000 passageiros por hora e direção). Para os dados adotados no modelo, os resultados destacam o interesse de: implementar o sistema Irisbus para uma procura horária igual ou inferior a 3000 passageiros por direção e de implementar o sistema convencional de elétrico para uma procura horária igual ou superior a 4000 passageiros por direção. Adicionalmente, avaliou-se a viabilidade do sistema *Autonomous Rail Rapid Transit* (ART), um sistema não convencional de transporte que poderá ter um potencial interessante para uma procura horária igual ou superior a 4000 passageiros por direção.

Palavras-chave: Sistemas de transporte, Flexibilidade, Sistema guiado, Custos, Análise multicritério, ELECTRE

ABSTRACT

In recent years, there has been great progress in the public transportation sector with regards to innovative alternatives, providing great advantages to several traditional public transport systems. Within these alternatives, more focus has been placed on transport systems that have an unconventional guidance which may benefit the public transport sector, since, for low average demand, these alternatives may be more economically viable than the conventional rail transport system, maintaining a good operational performance.

This master thesis intends to evaluate the potential of implementing unconventional public transport systems. In a first step, information about conventional and unconventional public transport systems were collected. Then, a multicriteria analysis method was used, more specifically the ELECTRE method, to analyse nine alternatives of conventional and unconventional transport systems through thirteen evaluation criteria associated with the system's performance, associated costs and environmental and urban aspects, for a total of four scenarios created with different hourly demand values (between 1000 and 4000 passengers per hour and direction). For the data adopted in the model, the results highlight the interest of: implementing the Irisbus system for an hourly search equal to or less than 3000 passengers per direction and to implement the conventional tram system for an hourly search equal to or greater than 4000 passengers per direction. Additionally, the feasibility of implementing Autonomous Rail Rapid Transit (ART), an unconventional transport system that could have great potential, was tested, that may have an interesting potential for an hourly demand equal to or greater than 4000 passengers per direction.

Keywords: Public transport system, Flexibility, Guided systems, Costs, Multicriteria analysis, ELECTRE

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Sistemas de transporte convencionais à superfície em meio urbano	3
2.1. Sistemas Rodoviários	3
2.1.1. Infraestrutura	3
2.1.2. Veículos	4
2.1.3. Operacionalidade	6
2.1.4. Custos associados	6
2.2. Sistemas Ferroviários	7
2.2.1. Infraestrutura	9
2.2.2. Veículos	10
2.2.3. Operacionalidade	11
2.2.4. Custos associados	11
3. Sistemas guiados não convencionais para transporte de superfície em zona urbana	12
3.1. Sistema guiado mecânico (SGMec)	13
3.1.1. Enquadramento histórico	13
3.1.2. Objetivo e funcionalidade	13
3.1.3. Características dos sistemas existentes	14
3.1.4. Elementos constituintes do sistema	14
3.1.5. Custos associados	17
3.1.6. Vantagens e desvantagens	17
3.2. Sistema guiado com um carril intermédio (SGCI)	19
3.2.1. Enquadramento histórico	19
3.2.2. Objetivo e funcionalidade	20
3.2.3. Elementos constituintes do sistema	20
3.2.4. Características dos sistemas existentes	21
3.2.5. Custos associados	22
3.2.6. Vantagens e Desvantagens	23
3.3. Sistema guiado ótico (SGO)	25
3.3.1. Enquadramento histórico	25
3.3.2. Objetivo e funcionalidade	25
3.3.3. Características dos sistemas existentes	26
3.3.4. Futuros sistemas guiados oticamente	26
3.3.5. Custos associados	28
3.3.6. Vantagens e Desvantagens	29
3.4. Sistema guiado magnético (SGMagn)	30
3.4.1. Enquadramento histórico	30
3.4.2. Objetivo e funcionalidade	30

3.4.3. Características dos sistemas existentes.....	30
3.4.4. Custos associados	31
3.4.5. Vantagens e Desvantagens	32
3.5. Análise comparativa dos sistemas de transporte convencionais e não convencionais em zona urbana	33
4. Metodologia multicritério de apoio à decisão	34
4.1. Instrumentos de análise na avaliação de sistemas	34
4.2. Escolha do método de AMC	35
4.3. Avaliação e escolha das variantes do método ELECTRE.....	36
4.4. Metodologia dos métodos ELECTRE III e IV	38
4.4.1. ELECTRE III.....	38
4.4.2. ELECTRE IV	42
5. Avaliação do potencial interesse de sistemas inovadores com guiamento. Aplicação do método ELECTRE III e IV.....	47
5.1. Metodologia	47
5.2. Estudos anteriores	47
5.3. Exposição do caso teórico.....	49
5.3.1. Cenário base	49
5.3.2. Alternativas a comparar	50
5.3.3. Cenários criados que fomentam a análise.....	51
5.3.4. Critérios a avaliar na análise multicritério	51
5.4. Estabelecimento e cálculo dos critérios a avaliar	53
5.4.1. Acessibilidade (g1).....	53
5.4.2. Intervalo entre circulações (g2).....	53
5.4.3. Fiabilidade (g3).....	55
5.4.4. Flexibilidade (g4)	56
5.4.5. Pontualidade (g5)	57
5.4.6. Segurança (g6).....	58
5.4.7. Custo do material circulante (g7)	59
5.4.8. Custo de construção (g8).....	60
5.4.9. Custo de exploração anuais (g9)	61
5.4.10. Atratividade (g10).....	61
5.4.11. Emissões de gases (g11).....	62
5.4.12. Inserção no espaço público (g12)	63
5.4.13. Ruído (g13)	64
5.5. Calibração dos limiares e pesos para o método ELECTRE.....	64
5.5.1. Pesos atribuídos aos critérios para o método ELECTRE III.....	64
5.5.2. Limiares estipulados para os critérios.....	65
5.6. Aplicação do método ELECTRE III e IV	66
5.6.1. Cenário 1 - 1000 passageiros/hora/direção.....	66
5.6.2. Cenário 2 - 2000 passageiros/hora/direção.....	67
5.6.3. Cenário 3 - 3000 passageiros/hora/direção.....	68
5.6.4. Cenário 4 - 4000 passageiros/hora/direção.....	68

5.6.5. Análise global dos resultados	69
5.7. Conclusões do capítulo.....	71
6. Aplicação do método ELECTRE III para análise de viabilidade do <i>Autonomous Rail Rapid Transit</i> (ART)	73
6.1. Metodologia	73
6.2. Aplicação do método ELECTRE III para o sistema ART	74
6.2.1. Cenário 1 - 1000 passageiros/hora/direção	74
6.2.2. Cenário 2 - 2000 passageiros/hora/direção	75
6.2.3. Cenário 3 - 3000 passageiros/hora/direção	75
6.2.4. Cenário 4 - 4000 passageiros/hora/direção	76
6.2.5. Análise global dos resultados	76
6.3. Conclusões do capítulo.....	78
7. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	79
7.1. Conclusões	79
7.2. Desenvolvimentos futuros	80
Referências Bibliográficas	81
Publicações escritas	81
Páginas Web.....	90
Anexo A – Características dos sistemas guiados mecânicos (SGMec)	99
Anexo B – Características dos sistemas guiados por carril intermédio (SGCI).....	101
Anexo C – Características dos sistemas guiados óticos (SGO)	102
Anexo D – Características dos sistemas guiados magnéticos (SGMagn).....	103
Anexo E – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação aos veículos utilizados.....	104
Anexo F – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação à operação e à infraestrutura	105
Anexo G – Análise económica	106
Anexo H – Cálculo da distância percorrida anualmente por cada sistema.....	111
Anexo I – Resumo dos dados a submeter para análise em relação ao cenário 1 (1000 passageiros/hora/direção).....	112
Anexo J – Resumo dos dados a submeter para análise em relação ao cenário 2 (2000 passageiros/hora/direção).....	113
Anexo K – Resumo dos dados a submeter para análise em relação ao cenário 3 (3000 passageiros/hora/direção).....	114
Anexo L – Resumo dos dados a submeter para análise em relação ao cenário 4 (4000 passageiros/hora/direção).....	115
Anexo M – Matrizes de credibilidade obtidas pelo método ELECTRE IV	116
Anexo N – Matrizes de credibilidade obtidas pelo método ELECTRE III	117
Anexo O – Conversão monetária	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Via BUS (a) convencional (Hawlich, 2006), (b) com separador físico (Divetis, S.d.), (c) numa autoestrada (Dream Alcalá, 2017)	3
Figura 2.2 – Sistema BRT, em via própria (a) na cidade de Curitiba (Brasil) (Volvo Bus, 2018), (b) na cidade de Bogotá (Colômbia) (Arias, 2014)	4
Figura 2.3 – Tipos de veículos coletivos rodoviários: (a) troleibus standard (johnzebedee, 2014), (b) autocarro duplo-piso, movido a diesel (STCP, 2019), (c) autocarro articulado, movido a gás natural (Carris, 2019), (d) autocarro biarticulado, movido a gás natural (Ferro, 2019)	5
Figura 2.4 – Primeiro sistema guiado (a) enquadramento geográfico (Willemsen, 2019), (b) ilustração do sistema (HolyLandPhotos' Blog, 2016)	8
Figura 2.5 – Cronologia dos principais acontecimentos históricos dos sistemas de transporte guiados. (Train History (a), S.d.), (Coulls, 1999), (Shedd, et al., S.d.) e (Choudhary, et al., 2018)	8
Figura 2.6 – Elétrico em (a) via banal (Lorenzi, et al., 2018), (b) via exclusiva (Alemão, 2017), (c) via própria (Ernstkers, 2007).....	9
Figura 2.7 – Sistema de transmissão de corrente elétrica via (a) carril intermédio (ALSTOM, 2018), (b) supercapacitor (elMIRA.es, 2017)	10
Figura 3.1 – Sistema guiado (a) mecânico (SGMec) (Moissejev, 2013), (b) com carril intermédio (SGCI) (Caraco, 2004), (c) ótico (SGO) (Tbus, 2008), (d) magnético (SGMagn) (Global BRT Data (a), S.d.)	12
Figura 3.2 – Temáticas que serão debatidas em cada sistema não convencional guiado.....	13
Figura 3.3 – SGMec (a) num autocarro (Kaushik, 2015), (b) num troleibus (WillD, 2007)	14
Figura 3.4 – SGMec em Nagoya (Global BRT Data (a), S.d.)	15
Figura 3.5 – Exemplo de um perfil transversal de um SGMec (Ceney, 2017).....	15
Figura 3.6 – Esquema da peça afunilada na transição entre sistema não guiado e guiado, no caso do SGMec (Ceney, 2017).....	16
Figura 3.7 – Descontinuidade num SGMec, em Cambridge (Edkins, 2009)	16
Figura 3.8 – SGMec a partilhar a via com um sistema ferroviário, em Essen (Smiler (c), S.d.)	18
Figura 3.9 – Patologias visíveis no SGMec em Cambridge (Cushing, et al., 2017)	19
Figura 3.10 – Elétrico com pneus de borracha, na cidade de Caen (Metro Report, 2017)	20
Figura 3.11 – Sistema guiado com um carril intermédio GLT (a) Peça metálica para a transição entre modo manual e guiado (London Guided Busway, S.d.), (b) Esquema do contacto carril-rodado (Snaevar, 2011).....	21
Figura 3.12 – Sistema de guiamento de um Translohr. A vermelho estão a rodados do veículo e a verde o carril (Chiesa, 2009)	21
Figura 3.13 – Comparação entre um carril de um elétrico comum (esquerda) e de um Translohr (direita) (Pierre, 2010).....	24
Figura 3.14 – Sistema de transporte ótico em Rouen (Smiley.toerist, 2013).....	25
Figura 3.15 – Esquema representativo do sistema guiado ótico (SGO) em relação (a) às linhas-guia (An, 2011), (b) ao leitor ótico (Siemens, 2008)	25
Figura 3.16 – ART em Zhuzhou, na China (Thompson, 2017)	27

Figura 3.17 – Sistema guiado magnético (a) Phileas (Mauritsvink, 2006), (b) EmX (Wymer, 2010) ..	30
Figura 3.18 – Marco magnético pertencente ao sistema Phileas (a) esquema representativo (An, 2011), (b) zona de implementação (Nikola, 2013)	31
Figura 4.1 – Classificação dos métodos de análise multicritério. Adaptado de Wang, et al. (2017). ..	35
Figura 4.2 – Função característica de (a) um pseudo critério (Sousa, et al., 2018), (b) um verdadeiro critério (Sousa, et al., 2018)	37

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Capacidade dos diferentes tipos de veículos rodoviários	5
Quadro 2.2 – Velocidade comercial de um sistema de autocarros urbanos consoante o tipo de infraestrutura	6
Quadro 2.3 – Custos dos veículos coletivos rodoviários.....	7
Quadro 2.4 – Custos de construção dos sistemas coletivos rodoviários	7
Quadro 2.5 – Propriedades dos modelos de elétricos Citadis	10
Quadro 2.6 – Velocidade comercial de um sistema de elétricos urbanos consoante o tipo de infraestrutura	11
Quadro 2.7 – Custos dos veículos coletivos ferroviários	11
Quadro 2.8 – Custo de construção dos sistemas coletivos ferroviários	11
Quadro 3.1 – Caraterísticas essenciais do SGMec	16
Quadro 3.2 – Custos dos veículos guiados mecanicamente	17
Quadro 3.3 – Custo de construção de um SGMec	17
Quadro 3.4 – Vantagens e desvantagens do sistema mecânico guiado	18
Quadro 3.5 – Caraterísticas dos veículos dos sistemas Translohr e TVR.....	22
Quadro 3.6 – Custos dos veículos de um SGCI	22
Quadro 3.7 – Custos de construção de um SGCI.....	22
Quadro 3.8 – Vantagens e desvantagens dos SGCI (TVR e Translohr).	23
Quadro 3.9 – Características dos veículos Irisbus, pertencentes ao SGO	26
Quadro 3.10 – Caraterísticas essenciais do SGO - Irisbus.....	26
Quadro 3.11 – Caraterísticas essenciais do SGO - ART	27
Quadro 3.12 – Custos dos veículos com SGO.....	28
Quadro 3.13 – Custos de construção do SGO.....	28
Quadro 3.14 – Vantagens e desvantagens do SGO.....	29
Quadro 3.15 – Características gerais do SGMagn - Phileas	31
Quadro 3.16 – Custos dos veículos associados a um SGMagn - Phileas.....	32
Quadro 3.17 – Vantagens e desvantagens do sistema guiado magnético	32
Quadro 4.1 – Especificidades das variantes do método ELECTRE	36
Quadro 4.2 – Notação básica do método ELECTRE III	38
Quadro 4.3 – Algoritmo de destilação segundo ordenação ascendente e descendente, para o ELECTRE III	41
Quadro 4.4 – Metodologia classificativa para ordenação final das alternativas	42
Quadro 4.5 – Notação básica para implementação do método ELECTRE IV.....	43
Quadro 4.6 – Algoritmo de destilação segundo ordenação ascendente e descendente, para o ELECTRE IV.....	46
Quadro 5.1 – Análise síntese de estudos anteriores para AMC e sua relação com o estudo que se pretende realizar.....	49
Quadro 5.2 – Alternativas a analisar	50

Quadro 5.3 – Cenários criados para análise dos sistemas de transporte	51
Quadro 5.4 – Critérios a ter em conta na AMC	52
Quadro 5.5 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua acessibilidade	53
Quadro 5.6 – Capacidade média de cada veículo, consoante o sistema de transporte.....	54
Quadro 5.7 – Intervalos entre circulações estimados nos diversos sistemas de transporte, ao longo dos cenários impostos.....	54
Quadro 5.8 – Limiares estabelecidos pelo IMTT para o intervalo entre circulações em hora de ponta	55
Quadro 5.9 – Classificação do intervalo entre circulações perante os vários sistemas de transporte	55
Quadro 5.10 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua fiabilidade	56
Quadro 5.11 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua flexibilidade	57
Quadro 5.12 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua pontualidade	57
Quadro 5.13 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua segurança	58
Quadro 5.14 – Custo unitário do material circulante em relação a cada sistema	59
Quadro 5.15 – Velocidade comercial aplicada a cada alternativa	59
Quadro 5.16 – Número de veículos mínimo em cada sistema, para a procura imposta	60
Quadro 5.17 – Custo do material circulante relativo dos vários sistemas de transporte, consoante o cenário estabelecido.....	60
Quadro 5.18 – Custos de construção de cada sistema	60
Quadro 5.19 – Custos de exploração anuais dos vários sistemas de transporte, consoante o cenário criado	61
Quadro 5.20 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua atratividade	62
Quadro 5.21 – Emissões unitárias CO ₂ de cada sistema de transporte	62
Quadro 5.22 – Classificação das alternativas em relação às emissões de gases. Valores exemplificativos para o cenário 1	63
Quadro 5.23 – Classificação dos tipos de sistema em relação à sua inserção no espaço urbano	63
Quadro 5.24 – Valor do ruído emitido pelos diferentes tipos de sistemas	64
Quadro 5.25 – Pesos estipulados para a análise de sensibilidade.....	65
Quadro 5.26 – Limiares definidos para a análise	65
Quadro 5.27 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 1.....	66
Quadro 5.28 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 2.....	67
Quadro 5.29 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 3.....	68
Quadro 5.30 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 4.....	68
Quadro 5.31 – Matriz de credibilidade das alternativas a4 e a7, para o W _i , em relação ao (a) cenário 3, (b) cenário 4	69
Quadro 5.32 – Quadro resumo das classificações dos sistemas de transporte avaliados no estudo realizado por An (2011).....	71
Quadro 6.1 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART – cenário 1.	74
Quadro 6.2 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 2..	75
Quadro 6.3 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 3..	75

Quadro 6.4 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 4..	76
Quadro 6.5 – Resumo dos custos de exploração máximos que preferenciam o sistema ART	76
Quadro 6.6 – Estimativa dos custos de exploração do sistema ART via análise económica.....	77
Quadro 6.7 – Estimativa da validação dos valores associados aos custos de exploração do sistema ART.....	77
Quadro A.1 – Propriedades dos SGMec.....	99
Quadro B.1 – Propriedades dos SGCI	101
Quadro C.1 – Propriedades dos SGO	102
Quadro D.1 – Propriedades dos SGMagn.....	103
Quadro E.1 – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação aos veículos utilizados.....	104
Quadro F.1 – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação à operação e à infraestrutura	105
Quadro G.1 – Quadro resumo com as percentagens atribuídas a cada alternativa, em relação ao sistema de elétrico, para os vários parâmetros da manutenção da via	106
Quadro G.2 – Preço dos combustíveis utilizados	107
Quadro G.3 – Quadro resumo do consumo de energia por alternativa	107
Quadro G.4 – Conversão de unidades de GLP para gás natural	107
Quadro G.5 – Manutenção regular da via rodoviária do sistema Irisbus, em Rouen	107
Quadro G.6 – Custo da limpeza da zona da via principal do sistema Irisbus, em Rouen	108
Quadro G.7 – Custo de manutenção do guiamento ótico e magnético	108
Quadro G.8 – Custos de manutenção do guiamento mecânico em Cleveland	108
Quadro G.9 – Discretização dos custos de exploração do cenário 1 (Procura horária de 1000 passageiro por direção).....	109
Quadro G.10 – Discretização dos custos de exploração do cenário 2 (Procura horária de 2000 passageiro por direção).....	109
Quadro G.11 – Discretização dos custos de exploração do cenário 3 (Procura horária de 3000 passageiro por direção).....	110
Quadro G.12 – Discretização dos custos de exploração do cenário 4 (Procura horária de 4000 passageiro por direção).....	110
Quadro H.1 – Quilómetros percorridos anualmente por sistema de transporte, consoante o cenário em questão	111
Quadro I.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 1.....	112
Quadro J.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 2.....	113
Quadro K.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 3	114
Quadro L.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 4	115
Quadro M.1 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 1	116
Quadro M.2 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 2	116
Quadro M.3 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 3	116
Quadro M.4 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 4	116

Quadro N.1 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 1 e grupo de pesos W_i	117
Quadro N.2 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 2 e grupo de pesos W_i	117
Quadro N.3 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 3 e grupo de pesos W_i	117
Quadro N.4 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 4 e grupo de pesos W_i	117
Quadro O.1 – Conversão monetária e respetiva data de conversão	118

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Autocarro articulado
ACB	Análise custo-benefício
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
AMC	Análise multicritério
AUD	<i>Australian Dollar</i>
ART	<i>Autonomous Rail Rapid Transit</i>
BA	Autocarro biarticulado
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CAR	Carruagens
C.Expl.	Custos de exploração
DC	Depois de Cristo
DP	Autocarro Duplo piso
ELECTRE	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>
EmX	<i>Emerald Express</i>
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GLT	<i>Guided Light Transit</i>
IMTT	Instituto de Mobilidade e dos Transportes Terrestres
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation</i>
PATH	<i>Partners for Advanced Transit and Highways</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation</i>
S.d.	Sem data
SGMec	Sistema Guiado Mecânico
SGCI	Sistema Guiado com Carril Intermédio
SGO	Sistema Guiado Ótico
SGMagn	Sistema Guiado Magnético
SMART	<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique</i>
ST	Autocarro standard
STCP	Sociedade dos Transportes Colectivos do Porto

TA	Troleibus articulado
TOPSIS	<i>Technique for Order by Similarity to Ideal Solution</i>
TST	Troleibus standard
TUB	Transportes urbanos de Braga
TVR	<i>Transport sur voie réservée</i>
VB	Via banal
VP	Via própria
VR	Via reservada

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Alternativa i
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
CV	Capacidade de um veículo
$c_{lk}(a_l, a_k)$	Grau de concordância parcial entre as alternativas l e k
$C(a_l, a_k)$	Grau de concordância global entre as alternativas l e k
D	Dominação das alternativas
dB	Decibel
$d_{lk}(a_l, a_k)$	Grau de discordância entre as alternativas l e k
E	Extensão total da linha num sentido
g/km_perc	Grama por quilómetro percorrido
g_j	Critério j
$g_j(a_i)$	Desempenho da alternativa i em relação ao critério j
h	Hora
I	Símbolo de indiferença entre alternativas
IC	Intervalo entre circulações
kg	Quilograma
km	Quilómetro

km/h	Quilómetro/hora
km_perc	Quilómetros percorridos
kWh	Quilowatt hora
l	Litro
M	Milhão
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m	Número total de critérios
min	Minuto
$m_p(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é estritamente preferido a a_k
$m_q(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é fracamente preferido a a_k
$m_i(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é indiferente a a_k
$m_o(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é exatamente igual a a_k
NOx	Óxido de azoto
Nv	Número de veículos
P	Símbolo de dominância entre alternativas
P	Procura horária gerada por direção
p/m ²	Pessoas por metro quadrado
PM	Matéria Particulada
p_j	Preferência estrita (forte) do critério j
q_j	Preferência fraca do critério j
Q	Qualificação das alternativas
r	Posição do <i>rank</i>
R	Símbolo de incomparabilidade entre alternativas
S_q	Quase Dominância
S_c	Dominância Canônica
S_p	Pseudo Dominância
S_s	Subdominância
S_v	Dominância de veto

$S(\lambda_{m\acute{a}x})$	Limiar de destilação
t_b	Taxa de batimento no terminal
t_r	Taxa de reserva
tx_{ocup}	Taxa de ocupação do veículo
V_c	Velocidade comercial
v_j	Veto do critério j
W_j	Peso do critério
$\sigma(a_l, a_k)$	Índice de credibilidade entre as alternativas l e k
λ	Nível de corte
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Nível de corte máximo
\$	Dólar
£	Libra inglesa
€	Euro
%	Porcentagem

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Uma boa rede de transportes públicos reflete numa boa imagem de uma cidade, e quanto mais eficiente, agradável e rápido for a deslocação do cidadão, maior será a sua mobilidade e maiores serão os benefícios para a sociedade em geral (Bertucci, 2011). Além disso, a qualidade da oferta do transporte coletivo aumenta a sua atratividade para com a população, reduzindo a utilização do transporte individual. Esta ação induz não só um maior equilíbrio na repartição modal de transportes, mas também ajuda a reduzir o congestionamento automóvel e a emissão de gases para atmosfera (Litman, 2020).

Os sistemas de transporte público mais utilizados nas áreas metropolitanas englobam o transporte ferroviário pesado suburbano, o metropolitano, o elétrico ou o autocarro. Nas últimas décadas, surgiram algumas inovações tecnológicas que combinam vantagens de alguns destes sistemas, tirando partido de algum tipo de guiamento menos convencional (Cervero, 2013).

Nas zonas de média e baixa procura, onde a implantação de sistemas de transporte pesados não é viavelmente económica, é de interesse avaliar a viabilidade de implementação dos sistemas de transporte não convencionais e averiguar quais os que se ajustam melhor face a uma determinada procura. Assim, a presente dissertação pretende avaliar o potencial interesse de alguns desses sistemas face aos tradicionais.

1.2. Objetivos

Esta dissertação surge na necessidade de analisar a viabilidade de sistemas não convencionais de transporte público, em zonas de média e baixa procura, que possam ser competitivos com os sistemas de transporte público tradicionais e com o transporte individual e que, simultaneamente, garantam um bom desempenho e uma boa atratividade.

Sendo assim, a presente dissertação tem em conta os seguintes objetivos:

- Identificar e analisar os sistemas de transporte convencionais mais competitivos em meio urbano;
- Identificar e analisar sistemas não convencionais de transporte guiados;
- Construir uma base de dados e de informação mundial, referente aos sistemas convencionais e não convencionais de transporte;
- Efetuar uma análise comparativa entre os sistemas convencionais e não convencionais de transporte, segundo vários critérios identificados;
- Identificar e descrever os instrumentos de avaliação mais frequentes na análise de sistemas de transporte;

- Escolher e demonstrar o método de análise que melhor se enquadra na análise qualitativa de sistemas de transporte;
- Analisar qualitativamente sistemas de transporte convencionais e não convencionais, com auxílio de um método analítico;
- Averiguar a viabilidade da introdução de um sistema de transporte não convencional ainda em estudo;

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em 7 capítulos e 15 anexos de apoio ao corpo de texto.

No presente capítulo, é dada uma introdução ao leitor sobre o tema da dissertação, através do seu enquadramento e através dos objetivos que se pretendem cumprir na dissertação.

No segundo capítulo, são introduzidos os sistemas de transporte convencionais em meio urbano, para zonas de média e baixa procura, onde são apresentadas as suas principais características.

No terceiro capítulo, são identificados e analisados sistemas não convencionais de transporte público. Para cada sistema é realizada uma análise referente às principais características de cada um, sendo que, no final de cada sistema é ultimado um resumo com as vantagens e desvantagens de cada um. No final do capítulo, é realizada uma análise comparativa entre os sistemas convencionais e não convencionais de transporte público.

Num quarto capítulo, são expostos vários instrumentos de análise de sistemas, onde são explicadas as diferentes metodologias e aplicações. No mesmo capítulo, é selecionado e analisado o método de avaliação a utilizar na análise qualitativa de sistemas, presente nos capítulos posteriores.

No quinto capítulo, é efetuada uma análise qualitativa multicritério, através do método ELECTRE III e IV, que foram selecionados no capítulo 4. Esta análise tem como objetivo analisar a viabilidade da introdução de sistemas de transporte não convencionais, comparando-os com os sistemas de transporte convencionais, através da introdução de vários critérios e cenários para analisar a variação das classificações das alternativas, consoante a procura horária imposta numa determinada linha, de um caso teórico.

No sexto capítulo, é analisada a viabilidade da introdução de um sistema não convencional de transporte, ainda em fase de teste, através do método ELECTRE III.

No último capítulo, é realizada uma conclusão de toda a dissertação e são identificados alguns pontos chave para desenvolvimentos futuros.

2. SISTEMAS DE TRANSPORTE CONVENCIONAIS À SUPERFÍCIE EM MEIO URBANO

Neste capítulo serão apresentados vários sistemas de transporte à superfície em ambiente urbano, para uma média e baixa procura. Estes sistemas de transporte foram agrupados em duas categorias gerais: sistemas rodoviários e sistemas ferroviários. Para cada sistema serão desenvolvidas as áreas referentes à infraestrutura, aos veículos, à operacionalidade e aos custos associados.

2.1. Sistemas Rodoviários

O autocarro é um veículo motorizado movido sobre pneus, bastante flexível, visto que, pode facilmente mudar o seu trajeto. No entanto, coexiste um grande problema relacionado com a eficiência deste sistema, visto que, em muitos casos este transporte tem uma baixa velocidade comercial, influenciando o tempo de trajeto e, por sua vez, tornando-o pouco atrativo (Nicolai, et al., 2008).

2.1.1. Infraestrutura

A nível operacional uma das infraestruturas mais relevante num sistema rodoviário é o tipo de via onde o veículo circula. Assim, um autocarro tem a possibilidade de circular em 3 tipos de vias: via banal, via reservada e via própria (IMTT, 2011).

A via banal, como é denominada pelo Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT), é uma via de circulação comum com o restante tráfego rodoviário, não sendo necessário a construção de uma via complementar para implementar um sistema de autocarros.

A via BUS é uma via segregada do restante tráfego rodoviário, podendo esta conter um separador físico ou não, como ilustram as **Figuras 2.1 (a), (b) e (c)**. O tráfego que pode circular numa via BUS difere muito de local para local, sendo possível circular autocarros conjuntamente com táxis, serviços de emergência, bicicletas ou motos (Comissão Europeia, 2016).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1 – Via BUS (a) convencional (Hawlich, 2006), (b) com separador físico (Divetis, S.d.), (c) numa autoestrada (Dream Alcalá, 2017)

Uma via própria é exclusiva a autocarros e veículos de emergência, sendo esta a grande vantagem face à via BUS. Este tipo de infraestrutura é, muitas vezes, associado ao BRT (*Bus Rapid Transit*), cuja tradução poderá ser equivalente a: autocarros rápidos de grande capacidade. Este sistema BRT não tem necessariamente de circular em via própria, porém esta via é fundamental em locais com grandes densidades de tráfego automóvel (Piccirillo, 2012). Mundialmente, este sistema de transporte pode ser encontrado em várias cidades, como em Curitiba (Brasil) e em Bogotá (Colômbia), como se ilustra nas **Figuras 2.2 (a) e (b)**, respetivamente. Este sistema de transporte é distinguido também por apresentar uma inovação no conceito de estação, como se pode observar nas figuras anteriormente referenciadas.



(a)



(b)

Figura 2.2 – Sistema BRT, em via própria (a) na cidade de Curitiba (Brasil) (Volvo Bus, 2018), (b) na cidade de Bogotá (Colômbia) (Arias, 2014)

2.1.2. Veículos

Em meio urbano, os veículos coletivos rodoviários mais comuns são os seguintes: standard (**Figura 2.3 (a)**), duplo-piso (**Figura 2.3 (b)**), articulado (**Figura 2.3 (c)**) e biarticulado (**Figura 2.3 (d)**). Entre as várias características que estes veículos apresentam, as que serão abordadas nesta dissertação dizem respeito à sua capacidade, acessibilidade e tipo de energia utilizada para se moverem.

Em termos de acessibilidade, o sistema rodoviário tradicional não é guiado, tendo como consequência a imprecisão na aproximação ao local de paragem, resultando num possível maior afastamento entre o veículo e o cais da paragem, dificultando o acesso dos passageiros no embarque e desembarque do veículo, especialmente em relação aos passageiros com mobilidade reduzida. Para colmatar este problema, surgiram soluções de apoio à acessibilidade dos veículos, como por exemplo as rampas manuais ou eletrônicas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.3 – Tipos de veículos coletivos rodoviários: (a) troleibus standard (Johnzebedee, 2014), (b) autocarro duplo-piso, movido a diesel (STCP, 2019), (c) autocarro articulado, movido a gás natural (Carris, 2019), (d) autocarro biarticulado, movido a gás natural (Ferro, 2019)

A capacidade direcional de um sistema de transporte depende da frequência de serviços e da capacidade de cada veículo. No **Quadro 2.1** encontram-se presentes os valores da capacidade média dos veículos anteriormente destacados. Os valores de capacidade média apresentados estão calculados segundo uma unidade padrão de 4 pessoas por metro quadrado [$4p/m^2$], que corresponde a uma unidade aceitável de conforto (Parkinson, et al., 1996). Esta unidade será utilizada em todos os seguintes valores de capacidade média de veículos, de modo a uniformizá-los para uma correta análise comparativa e qualitativa.

Quadro 2.1 – Capacidade dos diferentes tipos de veículos rodoviários

Tipo de veículo	Comprimento do veículo [m] ^[1]	Capacidade média do veículo [$4p/m^2$] ^[1]
Autocarro/Troleibus Standard	12	80
Autocarro Duplo-piso	12	95
Autocarro/Troleibus Articulado	18	120
Autocarro Biarticulado	24	150

Fonte: [1] – (COST, 2011);

Por último, o tipo de energia usada tem também um grande peso no desempenho do veículo, que influencia diretamente o ruído provocado pelo autocarro, os custos do material circulante, os custos operacionais, a autonomia do veículo e, especialmente, as emissões libertadas (Clean fleets, 2014). Dentro dos tipos de energia mais usados nos autocarros, destacam-se o diesel, o gás natural, o biocombustível, o híbrido, a elétrica e o hidrogénio (Civitas, 2016). Apesar de o diesel continuar a ser o combustível mais usado, tem vindo a perder significância ao longo do tempo, dando espaço a outros tipos de energia menos poluentes (American Public Transportation Association Fact Book, 2016). O grande problema do uso de diesel e de gás natural, está na emissão de gases poluentes para a atmosfera, sendo estes o dióxido de carbono (CO_2), o óxido de azoto (NO_x), o monóxido de carbono (CO) e a matéria particulada (PM) (RAC, S.d.). Em relação aos autocarros movidos a eletricidade, existem já várias soluções para o armazenamento da energia. Como exemplo, destaca-se o caso do troleibus, que é um autocarro que recebe energia elétrica via cabos aéreos (**Figura 2.3 (a)**), e o caso de um autocarro com bateria incorporada.

2.1.3. Operacionalidade

O tipo de via existente influencia bastante o desempenho de um sistema rodoviário, nomeadamente a sua velocidade comercial¹. No **Quadro 2.2** encontram-se valores médios das velocidades comerciais, retirados de um documento do IMTT (2011), onde são apresentados os valores referentes à velocidade comercial média em via banal, em via BUS e em via própria.

Quadro 2.2 – Velocidade comercial de um sistema de autocarros urbanos consoante o tipo de infraestrutura

Tipo de via	Velocidade comercial [km/h]
Via banal	11 a 20 (15,5 valor médio)
Via reservada (BUS)	15 a 20 (17,5 valor médio)
Via própria	18 a 25 (21,5 valor médio)

Fonte: (IMTT, 2011)

De forma a validar os valores presentes no quadro acima exposto, foram recolhidos os valores da velocidade comercial da Carris (empresa que gere a rede de autocarros na cidade de Lisboa) e da STCP (empresa que gere a rede de autocarros na cidade do Porto), sendo estes equivalentes a 14,29 km/h (Carris, 2018) e 15,8 km/h (STCP, 2018) respetivamente. Adicionalmente, para fazer um enquadramento a nível internacional, foram também recolhidos os valores médios de velocidade comercial nos autocarros a nível urbano de Espanha e França, sendo estes iguais a 13,8 km/h (Gobierno de España, 2016) e 16 km/h (An, 2011). Conclui-se assim que, todos os valores estão enquadrados dentro dos valores padrão definidos pelo IMTT (**Quadro 2.2**), em relação à categoria de via banal.

No caso do sistema BRT, a velocidade média do sistema foi de 25,19 km/h, na cidade de Bogotá, Colômbia (para o ano de 2019) e de 21,8 km/h em São Paulo, Brasil (para o ano de 2015) (Global BRT Data (a), S.d.). Em ambos os casos, os valores encontram-se enquadrados em relação aos valores padrão sugeridos pelo IMTT, para a categoria de via própria.

2.1.4. Custos associados

Os custos associados à implementação e operação de um sistema de transporte ramificam-se em custos de exploração e custos de investimento². Estes custos são bastante únicos, não sendo possível replicar valores entre projetos de implementação e operação de sistemas de transporte, uma vez que, cada sistema apresenta características diferentes como o tipo de terreno, a distância entre estações, o custo dos materiais de construção, entre outros. No entanto, de modo a simplificar a análise e a cumprir com o objetivo da presente dissertação, que se foca em comparar diferentes sistemas de transporte, foram recolhidos vários custos de construção e de material circulante. Em relação aos custos de

¹ A velocidade comercial é igual à distância entre a origem e um destino a dividir pelo tempo de percurso, contabilizando o tempo de paragem nas estações intermédias (Giga-fren, 2013).

² Os custos de investimento ramificam-se em dois grupos: custos de aquisição de material circulante e custos de construção. Dentro dos custos de construção, estão implícitos os custos de construção da infraestrutura, da sinalização e dos terminais. Os custos de exploração contemplam os custos de manutenção, de energia e de funcionamento do sistema, An (2011).

exploração, houve alguma dificuldade em encontrar valores padrão. Deste modo, no Capítulo 5, será apresentada uma análise económica para os custos de exploração dos sistemas de transporte selecionados.

No **Quadro 2.3** são facultados os valores referentes ao custo médio da aquisição de cada veículo coletivo rodoviário, segundo a sua tipologia. Todos os valores compreendem o custo médio de aquisição de um veículo a diesel em França (An, 2011), à exceção do caso do autocarro de duplo-piso, que foi obtido através de uma estimativa da aquisição de um autocarro a diesel da STCP, no Porto. Salienta-se que, todos os custos foram atualizados para o ano de 2018, através da atualização da taxa de inflação, com o auxílio da plataforma de conversão do Instituto Nacional de Estatística (S.d.).

Quadro 2.3 – Custos dos veículos coletivos rodoviários

Tipo de autocarro	Custo do veículo em M€	Custo do veículo em M€ (Valor atualizado para o ano de 2018 ^[3])
Standard	0,268 ^[1]	0,305
Articulado	0,439 ^[1]	0,499
Duplo-piso	0,395 ^[2]	0,420
Biarticulado	0,732 ^[1]	0,832
Troleibus standard	0,585 ^[1]	0,665
Troleibus articulado	0,975 ^[1]	1,109

Fonte: [1] – Valores referentes ao ano de 2007 (An, 2011); [2] – Valor referente ao ano de 2011 (Miranda, 2011); [3] – Valores atualizados para 2018 a 5 de setembro de 2019 (Instituto Nacional de Estatística (INE), S.d.);

Os custos de construção dependem muito do tipo de infraestrutura. Neste caso, foi possível desagregar os custos de construção nas seguintes 3 tipologias: autocarro em via banal, autocarro em via própria e troleibus em via própria, cujos valores se encontram disponíveis no **Quadro 2.4**.

Quadro 2.4 – Custos de construção dos sistemas coletivos rodoviários

Tipo de via	Custos de construção em M€/km	Custos de construção em M€/km (Valores atualizados para o ano de 2018 ^[4])	Valor médio em M€/km
Autocarro em via banal	0,30 a 2,00 ^[1]	0,42 a 2,81	1,62
Autocarro em via própria (BRT)	2,00 a 10,00 ^[2]	2,20 a 11,02	6,61
Troleibus em via própria	9,23 ^[3]	10,18	10,18

Fonte: [1] – Valor referente ao ano de 2000 (CERTU, 2005); [2] – Valor referente ao ano de 2010 (CERTU, 2013); [3] – Valor referente ao ano de 2010 (An, 2011); [4] – Valores atualizados para 2018 a 5 de setembro de 2019 (Instituto Nacional de Estatística (INE), S.d.)

2.2. Sistemas Ferroviários

A principal característica que define um sistema ferroviário é o seu guiamento. O início da história do sistema guiado começou há bastantes anos, antes da criação dos usuais carris de aço, no ano de 600DC, quando os Gregos necessitavam de atravessar de barco a grande península de Peloponeso (**Figura 2.4 (a)**). Como a península era muito grande e muito perigosa de atravessar de barco, os

Gregos construíram junto ao estreito de Corinto, um caminho de 6km onde os barcos eram transportados sobre vagões nos trilhos guias construídos (**Figura 2.4 (b)**) (Lewis, 2001).



Figura 2.4 – Primeiro sistema guiado (a) enquadramento geográfico (Willemsen, 2019), (b) ilustração do sistema (HolyLandPhotos' Blog, 2016)

Somente a partir do século XV começou a surgir uma mudança na forma como o guiamento era feito, tendo sido introduzidos carris de madeira (Train History (a), S.d.). A partir desta data ocorreram vários desenvolvimentos a nível tecnológico, no sector ferroviário. A **Figura 2.5** apresenta um diagrama cronológico com os acontecimentos mais marcantes na história dos sistemas guiados.

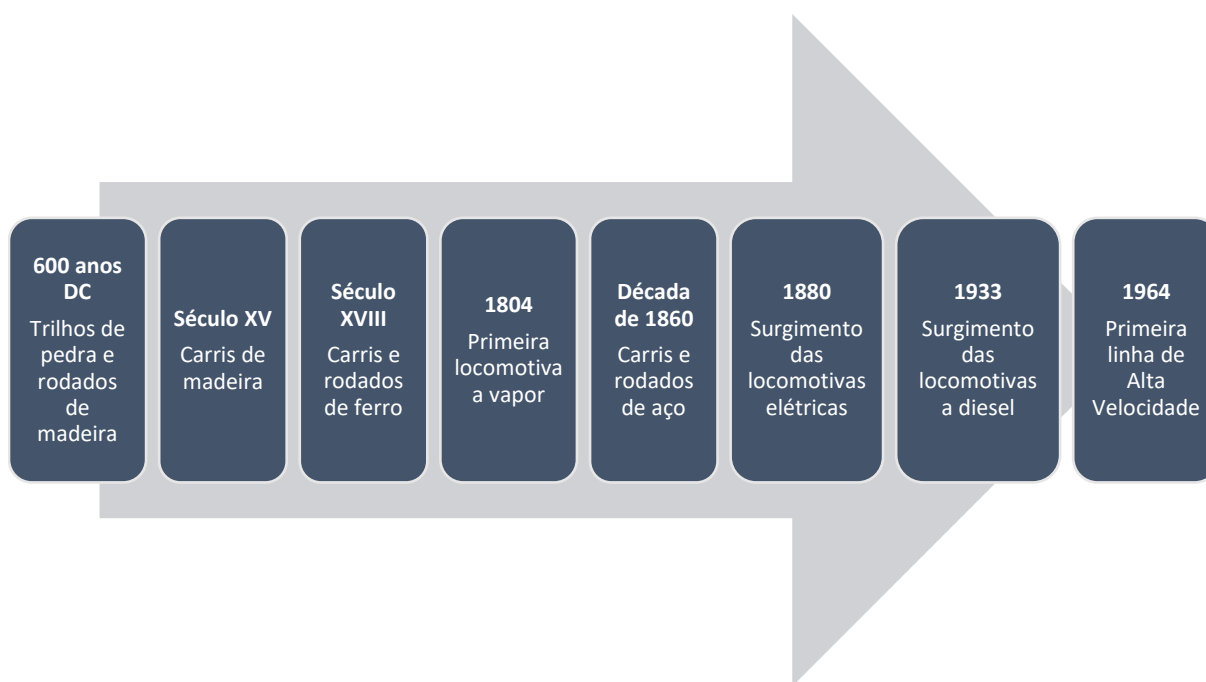


Figura 2.5 – Cronologia dos principais acontecimentos históricos dos sistemas de transporte guiados. **Fonte:** (Train History (a), S.d.), (Coulls, 1999), (Shedd, et al., S.d.) e (Choudhary, et al., 2018)

Do atual sistema ferroviário, serão destacados o metro ligeiro e o elétrico, uma vez que, esta dissertação tem como objetivo avaliar vários sistemas de transporte à superfície e em meio urbano, para uma procura média-baixa, que sejam economicamente viáveis de implementar.

2.2.1. Infraestrutura

Em primeiro lugar, é importante destacar que, para esta dissertação, não serão enumeradas as componentes materiais que constituem a superestrutura e infraestrutura de um sistema ferroviário, mas sim os tipos de vias de circulação onde os veículos podem operar, juntamente com as suas características.

Como já referido, neste estudo ir-se-ão abordar os casos do elétrico e metro ligeiro, à superfície. Em relação a estas duas tipologias, a diferenciação na literatura é pouco clara. É comum considerar-se que um elétrico pode circular em via comum com o restante tráfego ou em via exclusiva enquanto que o metro ligeiro circula em via própria, conseguindo uma maior capacidade (IMTT, 2014). Em contrapartida, Walker (2015) expõe que a diferença entre os dois sistemas está na distância entre as paragens fora da zona urbana, com o metro ligeiro a ter uma maior distância entre estações que o elétrico. Uma vez que, os veículos usados no metro ligeiro e nos elétricos podem ser idênticos, e que se está a fazer uma análise numa zona urbana, estes sistemas não irão ser diferenciados pela sua tipologia, mas sim pelo tipo de via em que circulam. Assim sendo, um elétrico pode circular numa via comum ao restante trânsito (**Figura 2.6 (a)**), em via exclusiva (**Figura 2.6 (b)**) e em via própria (**Figura 2.6 (c)**).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6 – Elétrico em (a) via banal (Lorenzi, et al., 2018), (b) via exclusiva (Alemão, 2017), (c) via própria (Ernstkers, 2007)

A grande diferença entre um sistema ferroviário e um sistema rodoviário, a nível funcional, está na existência de um guiamento. Em resumo, um sistema guiado tem as seguintes características:

- A garantia de uma maior segurança;
- O desenvolvimento de uma maior automação;
- A criação de uma maior atratividade para a população;
- A inflexibilidade e rigidez no trajeto seguido pelo veículo;
- A possibilidade de atingir maiores velocidades máximas;
- A possibilidade de atingir maiores capacidades no sistema;
- A garantia de acréscimo de conforto face ao sistema não guiado;
- A transmissão de uma maior fiabilidade de horários para os passageiros;
- A facilitação na aproximação às estações, facilitando a acessibilidade ao veículo;

Como vantagens destaca-se a autonomia do sistema, uma vez que, o condutor tem apenas de controlar a velocidade do veículo, o que permite atingir uma maior velocidade, garantindo a segurança do veículo (Profillidis, 2000). Por outro lado, como o trajeto já está imposto, é acrescida uma facilidade na aproximação às estações, garantindo uma boa acessibilidade dos passageiros aos veículos. A principal desvantagem do uso de um guiamento contínuo está na inflexibilidade que o veículo ferroviário tem no seu trajeto, estando sempre dependente da infraestrutura que habilita a sua circulação. Como consequência, o sistema tradicional de transporte ferroviário tem a característica de ser rígido, visto que não é possível oferecer um transporte ferroviário “porta a porta” como o transporte rodoviário, nem tem a possibilidade de fazer frente a eventuais incidências através de uma mudança de trajeto (Agarwal, S.d.).

2.2.2. Veículos

Em relação aos tipos de veículos, existe uma vasta gama com diferentes particularidades, como a capacidade do veículo e o tipo de infraestrutura que assegura a transmissão de energia ao veículo.

No **Quadro 2.5**, encontram-se as propriedades dos modelos de elétricos Citadis com destaque para as suas capacidades.

Quadro 2.5 – Propriedades dos modelos de elétricos Citadis

Modelo do veículo	Número de carruagens	Comprimento [m] ^[1]	Capacidade média do veículo [4p/m ²] ^[1]
Citadis 302	3	32	200
Citadis 402	4	43	300

Fonte: (An, 2011)

Durante muitos anos, a energia elétrica necessária para os elétricos se moverem era transmitida via cabos aéreos (Martinez, 2012). Atualmente, já existem novas tecnologia que dispensam a utilização de cabos aéreos, facilitando a sua implementação e reduzindo os custos de construção, bem como reduzindo o impacto visual transmitido. Dentro destas tecnologias destaca-se o fornecimento de energia por um carril intermédio (**Figura 2.7 (a)**) e a utilização de baterias internas que são carregadas nos terminais ou nas paragens via supercapitores (**Figura 2.7 (b)**) (Guerrieri, 2019).



(a)



(b)

Figura 2.7 – Sistema de transmissão de corrente elétrica via (a) carril intermédio (ALSTOM, 2018), (b) supercapacitor (elMIRA.es, 2017)

2.2.3. Operacionalidade

À semelhança dos autocarros urbanos, o IMTT (2011) designa os mesmos valores da velocidade comercial para o sistema ferroviário constituído por elétricos urbanos (**Quadro 2.6**).

Quadro 2.6 – Velocidade comercial de um sistema de elétricos urbanos consoante o tipo de infraestrutura

Tipo de via	Velocidade comercial [km/h]
Via banal	11 a 20 (15,5 valor médio)
Via reservada	15 a 20 (17,5 valor médio)
Via própria	18 a 25 (21,5 valor médio)

Fonte: (IMTT, 2011)

Segundo o relatório e contas de 2018, da Carris (2018) e da STCP (2018), o elétrico (sem diferenciação de vias) circulou em média, com uma velocidade comercial de 9,07 km/h e 8,6 km/h, respetivamente. Ambos os valores são bastante baixos, próximos do mínimo regulamentado pelo IMTT (2011). Adicionalmente, foi possível confrontar que o elétrico em via própria de Valência, em Espanha, circulou em 2012, com uma velocidade comercial média igual a 18,03 km/h (Via libre, 2013), estando este valor dentro da gama de valores apresentado pelo IMTT (2011), para a sua categoria.

2.2.4. Custos associados

No **Quadro 2.7** é apresentado o valor referente ao custo de um elétrico com 3 carruagens (An, 2011), sendo uma média do custo de aquisição de um elétrico em França.

Quadro 2.7 – Custos dos veículos coletivos ferroviários

Tipo de veículo	Custo do veículo em M€	Custo do veículo em M€ (Valor atualizado para o ano de 2018)
Elétrico articulado de 3 carruagens	2,10 ^[1]	2,33 ^[2]

Fonte: [1] – (An, 2011); [2] – Valor atualizado do ano 2008 para o ano 2018 (Instituto Nacional de Estatística (INE), S.d.);

No **Quadro 2.8** é apresentado o custo médio de construção, de um elétrico em via própria.

Quadro 2.8 – Custo de construção dos sistemas coletivos ferroviários

Tipo de via	Custo de construção em M€/km	Custo de construção em M€/km (Valores atualizados para o ano de 2018 ^[1])
Elétrico em via própria	15,80 ^[1]	17,66 ^[2]

Fonte: [1] – (ERRAC; UITP, 2012); [2] – Valor atualizado do ano 2009 para o ano 2018 (Instituto Nacional de Estatística (INE), S.d.);

3. SISTEMAS GUIADOS NÃO CONVENCIONAIS PARA TRANSPORTE DE SUPERFÍCIE EM ZONA URBANA

No Capítulo 2 foram identificadas as principais características dos sistemas convencionais rodoviários e ferroviários, tendo-se destacado que o primeiro oferece uma grande flexibilidade, proveniente da capacidade de se mover em todas as vias rodoviárias, e que o segundo oferece uma maior atratividade, em prol da existência do guiamento. Deste modo, foram efetuados grandes avanços tecnológicos, com o intuito de convergir ambas as vantagens dos dois sistemas de transportes públicos. É neste seguimento que surge o presente Capítulo 3, onde serão expostos os novos sistemas de transporte, fruto da convergência do conceito de flexibilidade, que os sistemas rodoviários têm, juntamente com o sistema de guiamento, presente nos sistemas ferroviários.

Estes novos sistemas de transporte podem ser divididos em 4 grupos de sistemas não convencionais guiados: sistema guiado mecânico (SGMec), sistema guiado com um carril intermédio (SGCI), sistema guiado ótico (SGO) e sistema guiado magnético (SGMagn) (**Figuras 3.1 (a), (b), (c) e (d)**).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.1 – Sistema guiado (a) mecânico (SGMec) (Moisseyev, 2013), (b) com carril intermédio (SGCI) (Caraco, 2004), (c) ótico (SGO) (Tbus, 2008), (d) magnético (SGMagn) (Global BRT Data (a), S.d.)

De modo a sintetizar os tópicos que serão abordados neste capítulo, contruiu-se o diagrama síntese presente na **Figura 3.2**.



Figura 3.2 – Temáticas que serão debatidas em cada sistema não convencional guiado

3.1. Sistema guiado mecânico (SGMec)

3.1.1. Enquadramento histórico

O SGMec foi o primeiro sistema não convencional guiado a ser implementado ao nível dos transportes coletivos à superfície e em via própria, tendo entrado em uso no ano de 1980, na cidade de Essen, na Alemanha (Smiler (c), S.d.). Até aos dias de hoje, foram realizadas melhorias neste sistema e, atualmente, este sistema de transporte já se encontra desenvolvido em vários países.

3.1.2. Objetivo e funcionalidade

O SGMec consiste em guiar um autocarro ou troleibus através de pequenas rodas de borracha horizontais, anexadas a um braço mecânico, que estão em contacto com os lancis da via, como se verifica na **Figura 3.3 (a)**, para o caso do autocarro, e na **Figura 3.3 (b)**, para o caso do troleibus. Estes veículos rodoviários, circulam numa via própria, segregada do restante tráfego (Kaushik, 2015).

Este guiamento tem um grande impacto ao nível da condução dado que o condutor só tem de controlar a velocidade do autocarro, não necessitando de o guiar. Além disso, fora dos corredores próprios para este sistema, o condutor pode assumir o controlo total do autocarro, que se comporta como um autocarro tradicional. Esta dualidade é muito importante visto que, torna o sistema bastante flexível e adaptável à realidade de cada zona (London Guided Busway, S.d.).



(a)



(b)

Figura 3.3 – SGMec (a) num autocarro (Kaushik, 2015), (b) num troleibus (WillD, 2007)

3.1.3. Características dos sistemas existentes

No **Anexo A** é possível encontrar uma lista de alguns SGMec existentes, juntamente com as suas características. Realça-se que, no caso do sistema Healthline, em Cleveland, e do sistema BRT, em Bangkok, apenas na zona de aproximação à estação é usado o guiamento através da roda horizontal. Deste modo, é realizada uma melhor aproximação à estação, assegurando um menor espaço entre o cais e a plataforma. Em todos os outros casos, o sistema é implementado tanto nas estações como nas vias de circulação, porém em muitos sistemas, a zona guiada é implementada apenas em parte da rede, normalmente nas zonas mais congestionadas (Ellis, et al., 2005).

No mesmo **Anexo A**, encontram-se presentes alguns valores de velocidades comerciais praticadas pelos sistemas identificados. Através da sua análise foi possível comprovar que existe uma grande variação das velocidades, com uma gama de valores compreendidos entre os 21,7km/h e os 80km/h e com um valor médio de 38km/h. Dentro dos valores apresentados destacam-se os sistemas de Adelaide e de Cambridge, com uma velocidade comercial de 80km/h e 60km/h, respetivamente. Estes elevados valores podem estar relacionados com a elevada extensão do sistema guiado e também com a distância entre estações existente (Currie, 2006) (Menzies, 2011).

No que diz respeito aos veículos usados em cada sistema, existe uma grande diversidade, uma vez que, todos os veículos estão aptos para circular nesta via exclusiva, desde que apresentem a largura adequada para entrarem na via e que seja implementada a roda-guia (Phillips, 2006). Assim sendo, a capacidade destes veículos é semelhante à capacidade dos veículos rodoviários sem guiamento, cujas capacidades podem ser confrontadas no **Quadro 2.1**.

3.1.4. Elementos constituintes do sistema

Para implementar este tipo de guiamento é necessário que exista uma plataforma base para os autocarros poderem circular. No caso dos sistemas do Reino Unido, o projeto de dimensionamento da infraestrutura teve como base os sistemas em Essen e em Adelaide, existindo um livro técnico com todos os detalhes estruturais deste sistema, denominado por: “*Guided Busway Design Handbook*”, elaborado por Ceney (2017). Desta forma, serão mencionados os principais elementos construtivos existentes neste sistema. Realça-se que, o conteúdo relacionado com o dimensionamento desta infraestrutura apenas é integralmente válido nos sistemas do Reino Unido. No caso de Nagoya, o

sistema é bastante diferente, sendo este elevado na totalidade do seu guiamento, como se pode verificar na **Figura 3.4**.



Figura 3.4 – SGMec em Nagoya (Global BRT Data (a), S.d.)

Em síntese, existem 3 elementos base para a conceção deste sistema: a via de circulação, o lancil e as peças de transição entre as zonas não guiadas e as zonas guiadas. A via de circulação é formada por duas lajes de betão armado, com uma largura igual a 0,7 metros. Na **Figura 3.5** está apresentado um corte transversal deste sistema mecânico, com duas vias de circulação, uma via de manutenção e uma via de emergência.

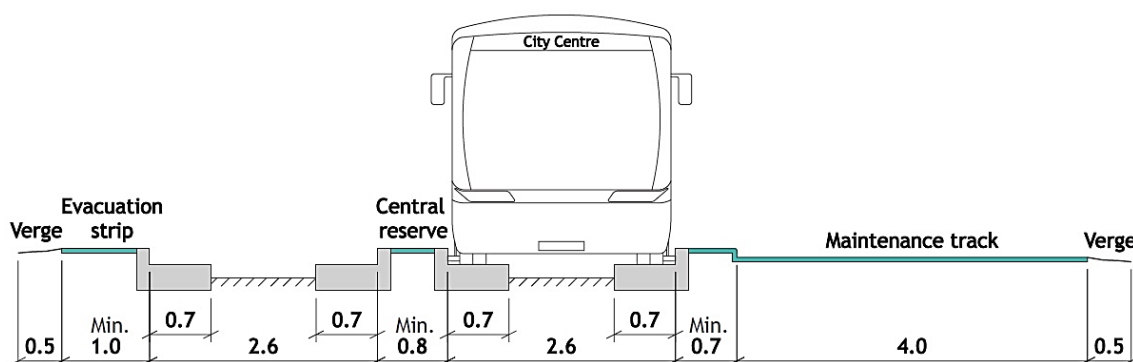


Figura 3.5 – Exemplo de um perfil transversal de um SGMec (Ceney, 2017)

Segundo Ceney (2017), o lancil-guia deve ter uma altura igual a 18 centímetros de modo a assegurar um bom guiamento do autocarro, através da roda horizontal. A distância entre as faces internas dos lancis da mesma via de circulação deve ser igual a 2,6 metros, considerando que um autocarro válido para este sistema tem de ter no mínimo 2,45 metros de largura, para assegurar o contacto constante entre o braço-guia e o lancil.

Dentro de uma zona urbana é inevitável que exista uma interrupção do mecanismo guiado, conseqüente de qualquer tipo de cruzamento. Em cada interrupção do sistema guiado é necessário implementar uma peça de transição. No entanto, esta peça difere consoante a extensão da interrupção.

É denominada como transição uma interrupção superior a 9 metros, sendo que, neste caso é necessário implementar uma peça metálica, de forma afunilada nas extremidades das zonas guiadas,

para absorver o impacto gerado pelo contacto entre a roda-guia e o lancil, tal como esquematiza a **Figura 3.6**. Por outro lado, é denominada como descontinuidade, uma interrupção inferior a 3 metros, e para este caso, não é necessário implementar toda a peça afunilada, basta incorporar uma pequena peça curva, juntamente com um pequeno braço metálico mecânico que possui molas para amortizar o impacto, tal como ilustra a **Figura 3.7**. Por último, caso uma interrupção tenha entre 3 metros e 9 metros, cabe a cada projetista determinar qual será a melhor forma de abordar a situação.

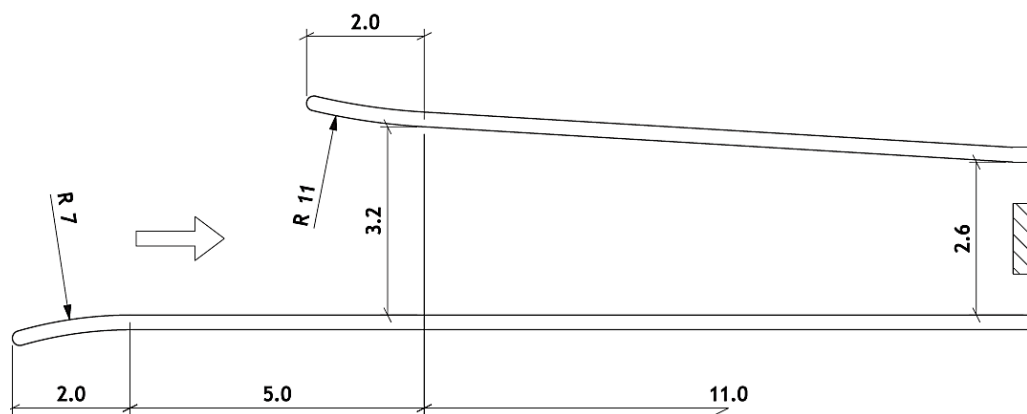


Figura 3.6 – Esquema da peça afunilada na transição entre sistema não guiado e guiado, no caso do SGMec (Ceney, 2017)

A nível operacional, existe uma diferença de velocidades máximas admissíveis. Num troço guiado a velocidade máxima é de 100km/h, numa transição entre a zona guiada e não guiada esta velocidade é de 40km/h e numa descontinuidade a velocidade máxima é de 50km/h.



Figura 3.7 – Descontinuidade num SGMec, em Cambridge (Edkins, 2009)

Em síntese, construiu-se o **Quadro 3.1** com os parâmetros essenciais deste sistema guiado.

Quadro 3.1 – Caraterísticas essenciais do SGMec

Sistema Guiado Mecânico (SGMec)	
Gradiente máximo	13% ^[1]
Largura de duas via [m]	6,00 ^[1]
Largura do veículo [m]	2,45 ^[1]
Raio de giração mínimo [m]	25 ^[1]
Velocidade comercial [km/h]	38 ^[2]

Fonte: [1] - (Ceney, 2017); [2] – Confrontar **Anexo A**;

3.1.5. Custos associados

Em relação aos veículos, estes apenas têm de ser complementados com dois braços-guias, um em cada lado, cujo valor é aproximadamente igual a 3 700\$, equivalente a 3 581€ (valor atualizado de 2011 para 2018) (Pessaro, et al., 2011). No **Quadro 3.2** são apresentados os custos dos veículos mais comuns neste sistema, já identificados anteriormente. Neste contexto foram utilizados valores dos autocarros tradicionais (Capítulo 2) e adicionados os custos das rodas-guia.

Quadro 3.2 – Custos dos veículos guiados mecanicamente

Tipologia	Custo do veículo em M€	Custo do veículo em M€ (Valor atualizado para o ano de 2018)	Custo dos veículos com as rodas-guia em M€
Standard	0,268€ ^[1]	0,305 ^[3]	0,309
Articulado	0,439€ ^[1]	0,499 ^[3]	0,503
Duplo piso	0,395€ ^[2]	0,420 ^[3]	0,424

Fonte: [1] – Valores referentes ao ano de 2007, sem o braço-guia (An, 2011); [2] – Valor referente ao ano de 2011 (Miranda, 2011); [3] – Valores atualizados para 2018 a 5 de setembro de 2019 (Instituto Nacional de Estatística (INE), S.d.);

Além dos custos dos veículos, foram recolhidos os custos de construção de vários sistemas, que estão expostos no **Anexo A**. No quadro presente em anexo, constata-se que, o sistema com menor custo é o que se situa em Bangkok, em consequência de este ser apenas guiado junto às estações. Em oposição, o sistema presente em Cleveland, que também é apenas guiado nas estações, possui um custo superior ao de Bangkok, possivelmente devido ao custo acrescido dos veículos de alto desempenho, onde cada um custa 900 000\$, equivalente a 819 000€ (Kenneth G. Sislak, S.d.).

Num outro patamar de valores, o sistema com o custo mais elevado é o de Nagoya, uma vez que, este é totalmente construído numa plataforma elevada. Deste modo, o custo deste sistema não será considerado, visto que este estudo tem como objetivo analisar sistemas à superfície. Além disso, para a presente dissertação não serão englobados os custos dos sistemas em Cleveland e em Bangkok, uma vez que, estes apenas são guiados junto às estações. Posto isto, foi construído o **Quadro 3.3** com o custo de construção médio.

Quadro 3.3 – Custo de construção de um SGMec

Custo de construção do SGMec em M€/km	
Intervalo de valores	Valor médio
6,16 a 8,42	7,26

Fonte: Confrontar **Anexo A**;

3.1.6. Vantagens e desvantagens

No **Quadro 3.4** estão resumidas as principais vantagens e as desvantagens deste sistema, seguido de uma justificação para as proposições assinaladas.

Quadro 3.4 – Vantagens e desvantagens do sistema mecânico guiado

Vantagens	Desvantagens
✓ Menor ocupação do espaço; [a]	✗ Elevados custos de construção e manutenção comparado com um serviço de autocarro tradicional;
✓ Maior velocidade comercial, que induz num menor tempo de percurso;	✗ Maiores custos relativamente aos veículos;
✓ Imagem mais distintiva da via de circulação dos autocarros;	✗ Todos os autocarros têm de ter a roda-guia para poderem circular nestas vias;
✓ Possível integrabilidade com outros modos de transporte; [b]	✗ Restrição da largura dos autocarros;
✓ Possibilidade de circular em modo não guiado;	✗ Necessário espaço para implementar o sistema;
✓ Maior atratividade;	✗ Grandes velocidades só são reproduzidas para grandes distâncias;
✓ Fácil integrabilidade do braço-guia nos autocarros;	✗ A via gera um obstáculo perante o restante tráfego;
✓ Não existem especificidades para o tipo de autocarro, sem ser a largura deste;	✗ Em caso de acidente, a via fica imobilizada dificultando a circulação dos restantes autocarros;
✓ Permite que a zona central da via não seja ocupada; [c]	✗ A estrutura da via tem uma forte preponderância a grandes deformações; [d]
✓ Aproximação precisa ao cais das estações;	✗ Tempo de embarque e desembarque não é menor em relação a outras tecnologias de aproximação às estações; [e]
✓ O condutor não necessita de controlar a direção quando existe guiamento mecânico;	✗ A roda-guia sofre grandes impactos junto às estações, traduzindo num elevado custo de manutenção; [f]
✓ Maior conforto;	✗ A transição entre a zona guiada e a zona não guiada é um ponto de destabilização do autocarro;
	✗ Cuidado acrescido quando neva;

[a] – Este sistema permite construir uma via com 2,6 metros de largura enquanto que, uma via normal de autocarros não guiados ocupa cerca de 3,5 metros de espaço (Pardo, et al., 2018).

[b] – Apesar da pouca aplicabilidade é possível conjugar um sistema ferroviário neste sistema guiado, como demonstra a **Figura 3.8** (Smiler (c), S.d.).



Figura 3.8 – SGMec a partilhar a via com um sistema ferroviário, em Essen (Smiler (c), S.d.)

[c] – A existência de solo no centro da via faz com que se reduzam os custos de construção e se beneficie de uma redução natural do ruído provocado pelo autocarro, podendo esta ser superior a 40% (Pardo, et al., 2018).

[d] – Devido ao impacto da roda-guia no lancil e às cargas dinâmicas provocadas pelos veículos, surgem várias patologias nas vigas, como a deformação e a fissuração do betão (Cushing, et al., 2017), como se pode ver na **Figura 3.9**.



Figura 3.9 – Patologias visíveis no SGMec em Cambridge (Cushing, et al., 2017)

[e] – Na cidade de Cleveland foi realizado um estudo que compara a utilização de um SGMec com um sistema sem guiamento. Em ambos os casos, foram usadas estações similares como amostra do estudo. Concluiu-se que, numa estação em linha reta, a distância entre o veículo e a plataforma é similar entre os dois sistemas, porém no caso de uma estação em curva, esta distância é muito superior no caso do sistema não guiado. No entanto, em ambas as estações o sistema guiado demora quase o dobro do tempo a aparcar junto ao cais (Pessaro, et al., 2011).

[f] – Segundo Pessaro, et al. (2011), o sistema não guiado *Emerald Express* (EmX), presente na cidade de Eugene, que apenas tem bandas amarelas feitas de polietileno para amortecer o impacto entre os pneus e o cais, apresenta um menor custo de manutenção face ao sistema guiado Healthline. Para o caso do sistema EmX, foram estimados custos na ordem dos 0,01\$ por cada milha percorrida (0,0057€/km_perc), em relação à substituição de 6 pneus nos veículos, num ano, e para o caso do sistema Healthline, foram contabilizados gastos na ordem dos 0,02\$ por milha percorrida (0,011€/km_perc), em relação à manutenção dos braços-guia.

3.2. Sistema guiado com um carril intermédio (SGCI)

3.2.1. Enquadramento histórico

No ano de 2001 foi apresentado um novo modo de transporte na cidade de Nancy, em França (Foot, et al., 2003). Este novo transporte é denominado por *tram with rubber tyres* (London Guided Busway, S.d.), cuja tradução designa um elétrico com pneus de borracha, tal como ilustra a **Figura 3.10**.

Atualmente, existem dois sistemas diferentes de elétricos com pneus de borracha: o *Guided Light Transit* (GLT), em inglês, ou *Transport sur voie réservée* (TVR), em francês e o Translohr. O GLT foi o primeiro sistema a ser criado e foi conceptualizado pela empresa Bombardier. O segundo sistema foi criado pela Lohr Industrie cujo produto é denominado por Translohr (King, et al., 2015).



Figura 3.10 – Elétrico com pneus de borracha, na cidade de Caen (Metro Report, 2017)

3.2.2. Objetivo e funcionalidade

Este sistema de elétrico tem como funcionalidade usar a tração dos pneus para se mover, juntamente com rodados de aço, no centro do eixo, para guiar o veículo. Desta forma, este sistema será denominado por: sistema guiado por um carril intermédio (SGCI).

Dentro dos SGCI, existem algumas diferenças. O sistema desenvolvido pela Bombardier permite que o veículo circule em modo guiado e em modo não guiado, transluzindo numa grande flexibilidade visto que, o veículo pode circular guiado sobre um carril e pode comportar-se como um autocarro, em modo não guiado. Já o sistema Translohr apenas circula segundo o carril-guia (Bourget, et al., 2010).

3.2.3. Elementos constituintes do sistema

Em prol de existirem duas formas distintas de utilização deste sistema, existiu a necessidade de segregar em dois pontos os elementos constituintes dos SGCI.

Sistema GLT

Como referido anteriormente, o sistema GLT tem a flexibilidade de poder circular guiado ou não, existindo uma peça metálica necessária para a transição entre o modo não-guiado e o modo guiado, ilustrada na **Figura 3.11 (a)**. Para tal acontecer, o veículo tem de parar para ajustar o rodado-guia à peça, para ser encaminhado a uma velocidade reduzida até ao centro do carril-guia. No caso da transição entre o modo guiado e o modo não guiado, o veículo também tem de parar, não sendo necessária nenhuma peça auxiliar (An, 2011).

Neste tipo de sistema, o rodado metálico faz um ângulo de 90° com um carril centrado na via (King, et al., 2015). Este rodado é composto por dois banzos e uma alma, que encaixam na cabeça do carril, como se observa na **Figura 3.11 (b)**. O carril-guia suporta um carregamento vertical de 750kg por rodado (An, 2011).

Atualmente, a Bombardier já não fabrica mais este tipo de sistema, devido a vários problemas operacionais, que tiveram como consequência vários acidentes por motivos de descarrilamentos e avarias (London Guided Busway, S.d.).

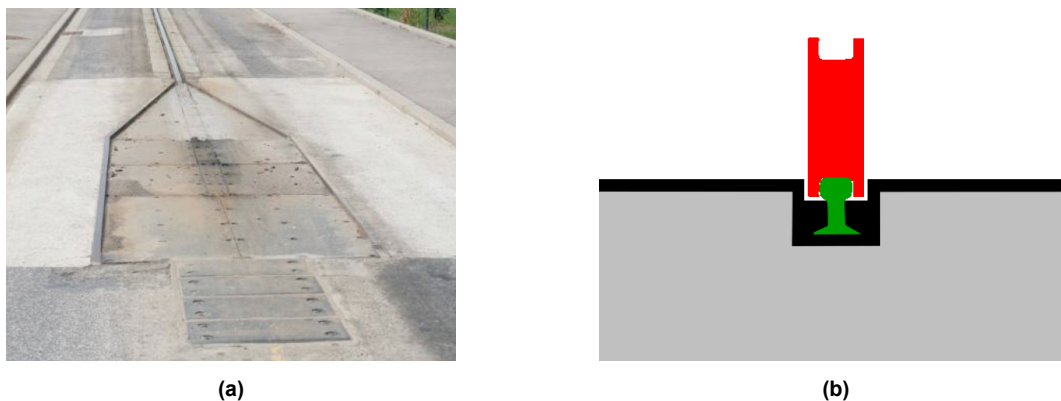


Figura 3.11 – Sistema guiado com um carril intermédio GLT (a) Peça metálica para a transição entre modo manual e guiado (London Guided Busway, S.d.), (b) Esquema do contacto carril-rodado (Snaevar, 2011)

Sistema Translohr

O sistema desenvolvido pela Lohr Industrie não possui a dualidade rodoferroviária que o sistema GLT possui. Este sistema tem a particularidade de ter dois rodados metálicos que estão sempre agregados ao carril intermédio, guiando constantemente o veículo (King, et al., 2015).

O carregamento projetado no carril-guia é mínimo (75kg por cada par de rodados), uma vez que, os rodados-guia têm um formato em “V”, fazendo um ângulo de 90° entre si e um ângulo de 45° com o carril como se observa na **Figura 3.12**. Assim sendo, os rodados estão fixos ao carril e as forças verticais e horizontais são resistidas pelos pneus do veículo (An, 2011).

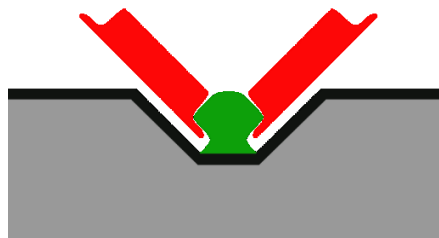


Figura 3.12 – Sistema de guiamento de um Translohr. A vermelho estão a rodados do veículo e a verde o carril (Chiesa, 2009)

Uma outra particularidade do sistema é que o próprio carril é bastante diferente do carril usado no sistema anterior. Este é apresentado com um formato trapezoidal, onde os rodados estão apoiados nos lados subjacentes ao topo da cabeça do carril, como se constata na mesma **Figura 3.12**.

3.2.4. Características dos sistemas existentes

No **Anexo B** são apresentados os diversos sistemas existentes no mundo, juntamente com as suas características. Foram também recolhidos alguns valores médios da velocidade comercial destes sistemas. Os dois tipos de SGCI apresentam uma velocidade média comercial de 17,25km/h e 20,33km/h, respetivamente para o sistema GLT e Translohr.

Em relação à fonte de energia de cada veículo, no caso do sistema GLT, os veículos são movidos a eletricidade ou a diesel. No que diz respeito ao sistema Translohr, os veículos são movidos a eletricidade captada por pantógrafos e, em alguns casos, por baterias incorporadas (NTL, S.d.).

No **Quadro 3.5**, estão apresentadas as características relativas aos sistemas Translohr e TVR.

Quadro 3.5 – Características dos veículos dos sistemas Translohr e TVR

Modelos dos veículos	Translohr - Lohr Industries/New TL				TVR - Bombardier
	STE3	STE4	STE5	STE6	TVR
Gradiente máximo	13%				13%
Largura de duas vias [m]	5,40				6,20
Largura do veículo [m]	2,20				2,50
Raio de giração mínimo [m]	10,50				12,00
Velocidade comercial [km/h]	20,33				17,25
Comprimento [m]	25	32	39	46	24,5
Capacidade média [4p/m ²]	127	170	213	255	131
Número de carruagens	3	4	5	6	3
Número de portas	3	4	5	6	4

Fonte: Todos os valores foram retirados de (An, 2011) à exceção da velocidade comercial (Confrontar **Anexo B**);

3.2.5. Custos associados

Os custos associados ao material circulante encontram-se presentes no **Quadro 3.6**

Quadro 3.6 – Custos dos veículos de um SGCI

Sistema	Modelo	Custos do veículo [M€]
TVR	TVR	2,02 ^[1]
Translohr	STE3	2,20 ^[2]
	STE4	2,43 ^[2]
	STE5	2,87 ^[2]
	STE6	6,76 ^[3]

Fonte: [1] – Valor atualizado do ano 2011 para o ano 2018 (An, 2011); [2] – Valores atualizados do ano 2010 para o ano 2018 (Parsons Brinckerhoff, 2010); [3] – Valor atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (Rail Technology (b), S.d.)

Dentro dos valores apresentados é de notar que o valor apresentado do veículo STE6 é bastante mais elevado que os restantes, uma vez que, foi recolhido de uma fonte diferente.

No **Anexo B**, encontram-se presentes os custos de construção dos vários SGCI. Analisando os dados recolhidos conclui-se que existe uma grande variação destes custos, especialmente no caso do sistema Translohr, que tem uma presença mais forte no mercado. Dos sistemas apresentados, o sistema na linha T6, em Paris, é o que detém um maior custo de construção com um valor aproximadamente igual a 30,87M€/km. Tal valor pode estar relacionado com o tipo de veículo, visto que esta linha possui veículos STE6 (NTL, S.d.). No **Quadro 3.7** encontra-se presente uma síntese dos custos de construção de ambos os sistemas.

Quadro 3.7 – Custos de construção de um SGCI

Custos de construção do SGCI em M€/km			
Sistema GLT/TVR		Sistema Translohr	
Intervalo de valores	Valor médio	Intervalo de valores	Valor médio
16,97 a 19,68	18,33	9,37 a 30,87	17,91

Fonte: Confrontar **Anexo B**;

3.2.6. Vantagens e Desvantagens

Num panorama geral, ambos os sistemas partilham várias vantagens e desvantagens, existindo algumas particularidades entre ambos, que serão devidamente destacadas. No **Quadro 3.8** estão resumidas algumas vantagens e desvantagens dos sistemas em questão.

Quadro 3.8 – Vantagens e desvantagens dos SGCI (TVR e Translohr).

	Vantagens	Desvantagens
<u>Sistema GLT/TVR</u>	✓ Dualidade de poder mover em modo guiado e não guiado;	✗ Capacidade limitada;
	✓ Inexistência de guiamento até à garagem;	✗ Perda de tempo devido à transição entre os dois modos;
		✗ Ocorrência de vários acidentes; [a]
		✗ Fim do fabrico destes veículos;
		✗ Fraca condução no modo manual;
	✓ Inexistência de mudanças de via;	✗ Velocidade comercial abaixo da estimada; [b]
<u>Sistema Translohr</u>	✓ Bidirecionalidade do veículo;	✗ Não existe qualquer dualidade, só se pode mover em modo guiado;
	✓ Maior segurança em relação ao sistema GLT;	✗ Necessidade da existência de garagens com ligação ferroviária;
	✓ Mudanças de via com apenas um carril, facilitando a sua implementação e reduzindo os custos;	✗ Perigo para velocípedes; [c]
<u>Geral (SGCI)</u>	✓ Possibilidade de circular até a um pendente máximo de 13%;	✗ Exclusividade de uma única empresa de construção;
	✓ Raios menores nas curvas;	✗ Surgimento de várias patologias na via; [d]
	✓ Largura das vias reduzida;	✗ Guiamento incompatível com outros sistemas guiados, tornando o sistema num nicho;
	✓ Construção da via mais simples que no sistema tradicional de dois carris;	✗ Menor eficiência em termos energéticos; [e]
	✓ Possibilidade de incorporar baterias com armazenamento de energia;	✗ Problemas com a neve;
	✓ Veículos modernos com pisos nivelados e sem emissões de CO ₂ , quando tracionado por corrente elétrica, no caso do GLT;	✗ Elevado preço dos veículos;
		✗ Fragilidade dos rodados-guia;
	✓ Boa aproximação às estações, melhorando a acessibilidade no embarque e desembarque de passageiros;	✗ Travagem brusca; [f]
		✗ Impossibilidade de cruzar com outro sistema de transporte ferroviário [g]

[a] – No sistema GLT, ocorreram vários acidentes como descarrilamentos, rebentamento de pneus, problemas na transição dos modos, entre outros (Cognasse, 2012). A maioria dos descarrilamentos foram provocados pela fraca fixação do rodado-guia, que muitas vezes sobrelevava o carril-guia, provocando o descarrilamento (Smiler (b), S.d.).

[b] – Foram realizados diversos estudos que comprovaram que o sistema GLT, em modo guiado, tem uma velocidade operacional inferior a um autocarro regular. Em muitas curvas, a velocidade de um veículo GLT é igual a 10km/h (Maller, 2018).

[c] – Devido à grande saliência do carril no pavimento, como ilustra a **Figura 3.13**, e ao tipo de carril usado, têm existido vários acidentes com velocípedes (Gino De Pauli, 2009).



Figura 3.13 – Comparação entre um carril de um elétrico comum (esquerda) e de um Translohr (direita) (Pierre, 2010)

[e] – Em virtude de o sistema ser guiado, os pneus estão constantemente a passar no mesmo local da via, causando fortes degradações na via e provocando o rebentamento de vários pneus (Smiler (b), S.d.).

[f] – Comparando este sistema com um sistema ferroviário tradicional, a força necessária para mover um veículo sobre pneus é muito maior que a força necessária para mover um veículo sobre rodados metálicos, devido à grande força de atrito entre um pneu e o pavimento (King, et al., 2015).

[g] – Num veículo com tração pneumática, o sistema de travagem também é pneumático, como num autocarro comum, o que promove uma maior eficiência na travagem do veículo. No entanto, também provoca um maior desconforto do passageiro perante a travagem (Desbazeille, et al., 2003).

[h] – Devido à grande diferença dos carris, não existe a possibilidade de cruzamentos entre um SGCI e um sistema ferroviário tradicional (Keall, 2019).

3.3. Sistema guiado ótico (SGO)

3.3.1. Enquadramento histórico

O SGO foi introduzido inicialmente na cidade de Rouen, em França, no ano de 2001 (**Figura 3.14**). Este sistema foi desenvolvido pela empresa MATRA, e posteriormente foi comprado pela Siemens, que atualmente tem a patente do sistema ótico (Shladover, et al., 2007).



Figura 3.14 – Sistema de transporte ótico em Rouen (Smiley.toerist, 2013)

3.3.2. Objetivo e funcionalidade

O objetivo deste sistema passa por encurtar a distância entre o veículo e o cais da paragem, permitindo um embarque e desembarque mais acessível para os passageiros. Simultaneamente, também tem como objetivo construir um sistema que facilite ao condutor efetuar esta proximidade às paragens, garantindo sempre a segurança e o conforto dos passageiros (Pequignot, 2014).

Em termos funcionais, este sistema ótico foi desenvolvido para detetar umas linhas a tracejado, situadas no centro da via de circulação (**Figura 3.15 (a)**) e assim proceder ao seu guiamento ótico, através de uma câmara que está anexada na parte superior do veículo (**Figura 3.15 (b)**) (Siemens, 2008).

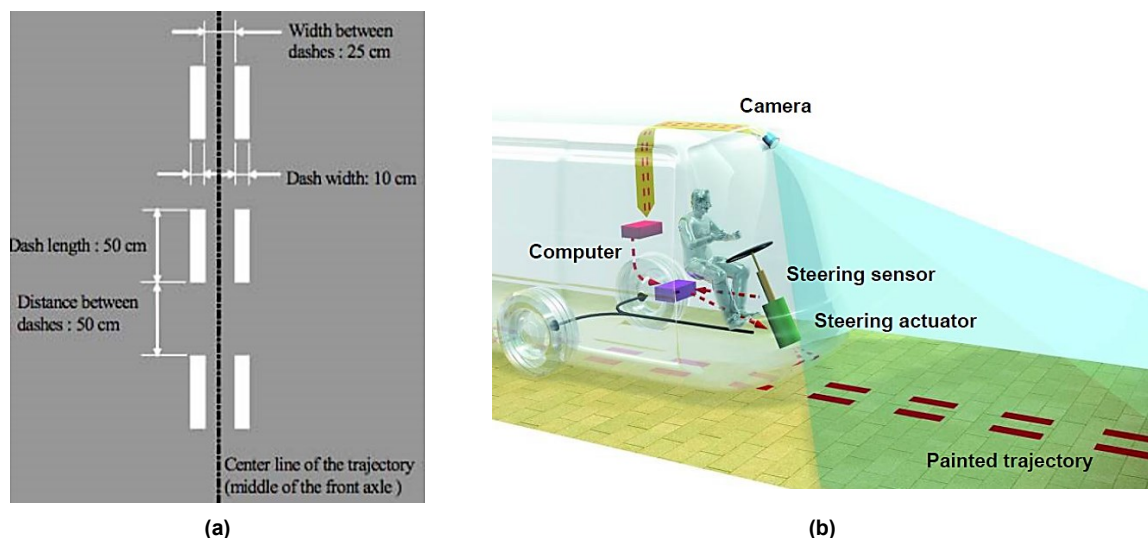


Figura 3.15 – Esquema representativo do sistema guiado ótico (SGO) em relação (a) às linhas-guia (An, 2011), (b) ao leitor ótico (Siemens, 2008)

3.3.3. Características dos sistemas existentes

No **Anexo C** são apresentados os SGO presentes no mundo, juntamente com as suas características. É de notar que, para alguns casos não foi possível encontrar dados informativos.

Analisando o quadro presente no **Anexo C**, verifica-se que a velocidade comercial dos sistemas está compreendida entre os valores de 17,5km/h e 29,9km/h, com um valor médio igual a 21,2km/h.

Muitos dos SGO presentes no **Anexo C** apenas utilizam o guiamento junto às estações, de modo a potenciar uma boa aproximação aos cais existentes. Neste caso, é essencial que existam linhas-guias com 20 metros de comprimento, antes e depois da estação (Shladover, et al., 2007).

Todos os sistemas mencionados têm como frota veículos do modelo Irisbus, standard ou articulados. Além disso, estes veículos podem mover-se a eletricidade (cabos ou bateria) ou a diesel. No **Quadro 3.9** encontram-se sintetizados os tipos de veículos existentes, bem como as suas principais características.

Quadro 3.9 – Características dos veículos Irisbus, pertencentes ao SGO

Modelo	Tipo	Localização	Comprimento [m] ^[1]	Capacidade média [4p/m²] ^[1]	Fonte de energia ^[2]
Irisbus Crealis Neo 18	Articulado	Rouen e Nîmes, França	18	120	Biodiesel
Irisbus Citelis 18	Articulado	Rouen, França	18	120	Biodiesel
Irisbus Cristalis	Standard	Castellón, Espanha	12	80	Híbrido Diesel-Elétrico (Troleibus)

Fonte: [1] – (COST, 2011); [2] – (Global BRT Data (a), S.d.);

No **Quadro 3.10** encontram-se resumidas as características mais importantes de um SGO.

Quadro 3.10 – Características essenciais do SGO - Irisbus

Sistema Guiado Ótico (SGO) - Irisbus	
Gradiente máximo	13% ^[1]
Largura de duas via [m]	6,80 ^[2]
Largura do veículo [m]	2,55 ^[2]
Raio de giração mínimo [m]	25 em modo não guiado/12 em modo guiado ^[1]
Velocidade comercial [km/h]	21,2 ^[3]

Fonte: [1] – (Thuret, 2012); [2] – (EREA; ingérop; SYSTRA, 2005); [3] – Ver **Anexo C**;

3.3.4. Futuros sistemas guiados oticamente

Na cidade de Zhuzhou, na China, está a ser criado um sistema de transporte público que consiste em incorporar um veículo que se assemelha a um elétrico, com pneus, que é guiado oticamente, como se pode observar na **Figura 3.16**. Este sistema é denominado por: *Autonomous Rail Rapid Transit* ou simplesmente ART.



Figura 3.16 – ART em Zhuzhou, na China (Thompson, 2017)

As composições de um ART são constituídas por sensores que captam as linhas tracejadas, de modo a seguir a trajetória implementada. Para além deste *software*, os veículos também são suportados por outros tipos de tecnologia, que ajudam: na precisão do veículo, através de satélites; na deteção do tracejado, através de radares; e na estabilização do veículo, através do controle da inércia (Peter Newman, et al., 2018).

No **Quadro 3.11**, encontram-se algumas características deste novo sistema autónomo.

Quadro 3.11 – Características essenciais do SGO - ART

Sistema Guiado Ótico (SGO) - ART	
Comprimento [m]	31,64 ^[1]
Largura do veículo [m]	2,65 ^[1]
Capacidade de 3 carruagens [4p/m²]	200 ^[2]
Velocidade máxima [km/h]	70 ^[1]
Largura mínima da via [m]	3,83 ^[1]
Largura mínima de duas vias [m]	7,66
Raio mínimo de giração [m]	15 ^[3]

Fonte: [1] – (Rastogi, 2017); [2] – Valor estimado com base no elétrico de 32m (COST, 2011); [3] – (Peter Newman, et al., 2018);

Em relação ao tipo de energia usada, este sistema possui baterias de lítio e titânio, que têm uma autonomia de 40km, quando estão carregadas na totalidade e uma autonomia de 25km, quando são carregadas por 10 minutos (Peter Newman, et al., 2018). Além das baterias de lítio e titânio, as composições estão providas por supercapacitores, que têm uma grande capacidade de armazenamento de energia, o que faz com que um veículo possa recarregar esta bateria num espaço de 30 segundos e assegurar uma autonomia entre 3km a 5km (Wong, 2018). Além disso, devido ao supercapacitor, o veículo consegue recuperar 85% da energia, devido ao processo de travagem (New China TV, 2016).

3.3.5. Custos associados

Relativamente aos SGO atuais, o custo da implementação do sistema ótico num veículo é de aproximadamente 50 000€ por veículo (Systra; Cowi, 2014). Até à data, apenas os modelos Irisbus são equipados com este sistema.

De modo a obter uma variedade de custos de material circulante, foram recolhidos dados de custos referentes ao sistema troleibus, presente em Castellón, e ao sistema de autocarros articulados, presente em Rouen. Adicionalmente, foi também recolhida uma estimativa de valores do sistema ART, na China. Todos estes valores estão presentes no **Quadro 3.12**.

Quadro 3.12 – Custos dos veículos com SGO

Modelo	Tipo de veículo	Localização	Custo do veículo em M€
Irisbus Citelis 18	Autocarro articulado	Rouen, França	0,52 ^[1]
Irisbus Cristalis	Troleibus standard	Castellón, Espanha	1,14 ^[2]
ART	Elétrico 3 carruagens	Zhuzhou, China	2,00 ^[3]

Fonte: [1] – Valor atualizado do ano 2006 para o ano 2018 (COTITA, 2009); [2] – Valor atualizado do ano 2002 para o ano 2018 (Olmos, et al., 2007); [3] – Valor referente ao ano de 2018 e convertido de \$ para € (1\$=0,91€) (Wong, 2018);

No **Anexo C** estão presentes os custos de construção associados aos diferentes sistemas existentes. Relativamente aos valores apresentados, retém-se que existe uma grande discrepância de valores, com um intervalo de valores entre 4,40M€/km e 13,94M€/km. O sistema presente em Castellón é o que apresenta um maior custo de construção, que poderá estar relacionado com o facto de integrar veículos troleibus. Em contrapartida, o sistema presente na cidade de Nîmes tem um custo similar ao de Castellón, e este apenas tem um sistema de autocarros guiados, que têm como fonte de energia o biodiesel.

No **Quadro 3.13** encontram-se expostos os diferentes valores de construção, tanto do sistema Irisbus, como do sistema ART. Para este último sistema mencionado, os valores apresentados são apenas uma estimativa da empresa fornecedora CRRC. É de notar que, foram calculados dois valores referentes ao custo médio do custo de construção do sistema Irisbus, um com o sistema em Castellón e outro sem este.

Quadro 3.13 – Custos de construção do SGO

Custos de construção do SGO em M€/km ^[1]			
Sistema SGO - Irisbus		Sistema SGO - ART	
Intervalo de valores	Valor médio	Intervalo de valores	Valor médio
4,40 a 13,94	8,35 ^[2] /9,76 ^[3]	6,37 a 13,65	10,01

Fonte: [1] – Confrontar **Anexo C**; [2] – Valor médio dos sistemas Irisbus à exceção do sistema em Castellón; [3] – Valor médio dos sistemas Irisbus;

3.3.6. Vantagens e Desvantagens

No **Quadro 3.14** encontram-se enumeradas as vantagens e desvantagens do SGO.

Quadro 3.14 – Vantagens e desvantagens do SGO

Vantagens	Desvantagens
✓ Maior velocidade comercial;	✗ Grande manutenção; [d]
✓ Menores raios de giração em modo guiado;	✗ O mercado das lentes óticas ainda é um nicho;
✓ Imagem mais apelativa para a população, especialmente no caso do ART por ter formato de um elétrico;	✗ Indispensável a presença de um motorista;
✓ Boa aproximação às estações;	✗ Custo acrescido pela implementação dos sensores óticos;
✓ Grande flexibilidade; [a]	✗ Pouca precisão da lente ótica (exceto o caso do ART que tem outras tecnologias para melhorar a precisão); [e]
✓ Forte interligação com outros meios de transporte; [b]	
✓ Facilidades em caso de avaria; [c]	
✓ Infraestrutura fácil de executar;	
✓ Incremento da capacidade no caso do ART;	

[a] – Este sistema dota de uma grande flexibilidade visto que pode transitar com grande facilidade entre a zona guiada e a zona não guiada.

[b] – O sistema de guiamento não provoca nenhuma barreira para com outros meios de transporte, nem para com a mobilidade pedonal e velocipédica.

[c] – Em caso de avaria de um veículo, um outro veículo pode facilmente ultrapassar o avariado.

[d] – A grande manutenção necessária para o bom funcionamento do SGO acaba por encarecer os custos de exploração do sistema, levando muitas vezes ao abandono da ideologia deste sistema de transporte, substituindo-o por outro, como aconteceu em Las Vegas e em Clermont-Ferrand (Foot, et al., 2010).

[e] – Em relação à lente ótica, qualquer obstáculo que surja entre a lente e a linha-guia, afeta a eficácia da lente. Além disso, o pavimento deve estar com uma boa manutenção para a lente ótica poder detetar a linha a tracejado (Shladover, et al., 2007).

3.4. Sistema guiado magnético (SGMagn)

3.4.1. Enquadramento histórico

No ano de 2004, em Eindhoven, na Holanda, foi implementado um novo sistema de transporte guiado chamado Phileas (Bentley, et al., 2016). Devido a vários problemas técnicos, o fornecedor destes veículos abriu falência em 2014.

Num outro cenário, na Califórnia, Estados Unidos da América, a companhia *Partners for Advanced Transit and Highways* (PATH) já tinha desenvolvido um outro protótipo de um sistema guiado magnético, tendo começado o projeto em 1988 (Hedges, et al., 2017). Este protótipo sofreu vários testes até à data, com resultados bastante positivos em relação às condições climáticas e aproximação aos cais das estações. Este protótipo foi testado na cidade Eugene, nos Estados Unidos da América, cujo sistema foi denominado por EmX (Hedges, et al., 2017). Nas **Figuras 3.17 (a) e (b)**, encontram-se ilustrados os sistemas Phileas e EmX, respetivamente.



(a)



(b)

Figura 3.17 – Sistema guiado magnético (a) Phileas (Mauritsvink, 2006), (b) EmX (Wymer, 2010)

3.4.2. Objetivo e funcionalidade

O objetivo de um sistema guiado magnético é o de implementar um transporte que seja flexível, viável, confortável e ecológico (Shladover, et al., 2007). Em termos funcionais, o sistema incorpora um autocarro com pneus de borracha, com um sistema inteligente incorporado que reconhece o trajeto através de uns marcos magnéticos instalados.

3.4.3. Características dos sistemas existentes

Atualmente, o sistema Phileas não se encontra mais em produção. No **Anexo D** estão enumerados vários locais de implementação do sistema Phileas e do sistema EmX, juntamente com as suas características. É de notar que existiram mais locais onde o sistema Phileas iria ser integrado, porém nunca chegou a acontecer, dando-se destaque à cidade de Pescara, em Itália (Waard, 2014).

Tanto o sistema EmX como o sistema Phileas permitem que o veículo circule de uma forma autónoma, dando controlo total ao veículo tanto na trajetória como na velocidade. Para que tal seja possível, são

incorporados na via, dentro do pavimento, marcos magnéticos distanciados entre 4 a 5 metros, que servem para definir a trajetória do autocarro e orientar magneticamente o veículo (Fai, 2008). Na **Figura 3.18 (a)** está ilustrada uma representação geométrica de um marco magnético, juntamente com as suas dimensões e na **Figura 3.18 (b)**, está representado o SGMagn na Coreia do Sul, juntamente com a zona de implementação do marco magnético, na faixa verde.

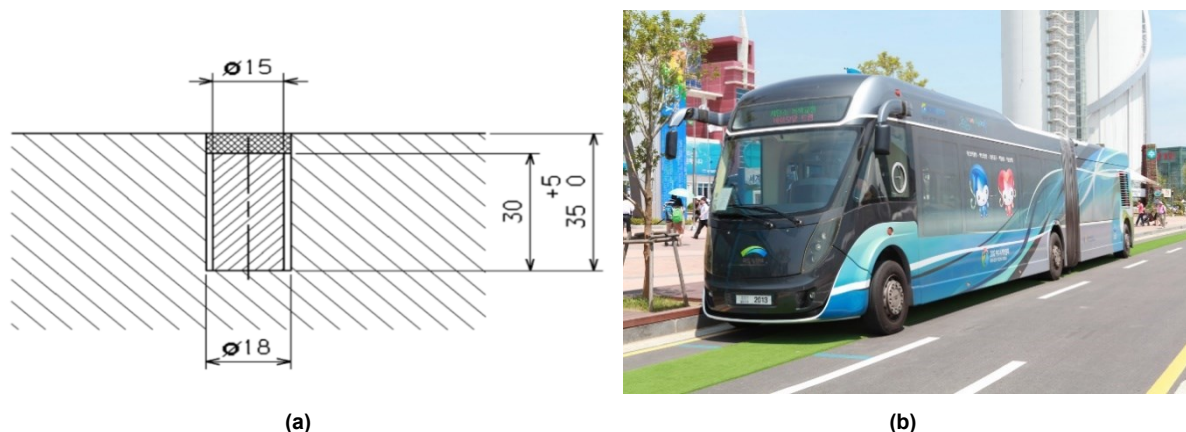


Figura 3.18 – Marco magnético pertencente ao sistema Phileas **(a)** esquema representativo (An, 2011), **(b)** zona de implementação (Nikola, 2013)

Analisando o sistema Phileas, existem três tipos diferentes de veículos: autocarros articulados e autocarros biarticulados, com duas dimensões distintas. Em relação à velocidade comercial, o SGMagn - Phileas apresenta valores compreendidos entre 21km/h e 35km/h, com um valor médio de 26,4km/h. Além disso, este veículo é movido a gás liquefeito de petróleo (GLP) e tem a possibilidade de se mover a eletricidade até a uma distância de 3km (Shladover, et al., 2007).

No **Quadro 3.15** estão presentes várias características do sistema Phileas.

Quadro 3.15 – Características gerais do SGMagn - Phileas

Características do SGMagn - Phileas		
Velocidade operacional [km/h]		26,4 ^[1]
Largura de uma via [m]		3,3 ^[2]
Largura de duas vias [m]		6,6 ^[2]
Raio mínimo de giração [m]		12 ^[2]
Gradiente máximo		13% ^[2]
Fonte de energia do veículo		Híbrido Elétrico – GLP ^[3]
Capacidade média [4p/m ²]	Veículo articulado - 18,5m	103 ^[4]
	Veículo biarticulado - 24,5m	129 ^[4]
	Veículo biarticulado - 26m	141 ^[4]

Fonte: [1] – Ver Anexo D; [2] – (Thuret, 2012); [3] – (Heijden, et al., 2005); [4] – (An, 2011);

3.4.4. Custos associados

No que diz respeito aos custos associados ao SGMagn, apenas foi possível recolher dados relativos ao sistema Phileas, visto que o sistema EmX ainda se encontra em estudo. Desta forma, numa primeira

instância foram recolhidos os custos associados à aquisição dos veículos, que se encontram presentes no **Quadro 3.16**.

Quadro 3.16 – Custos dos veículos associados a um SGMagn - Phileas

Tipo de veículo	Capacidade média [4p/m ²]	Custo do veículo em M€
Autocarro articulado – 18,5m	103	1,25 ^[1]
Autocarro biarticulado – 24,5m	129	1,53 ^[1]
Troleibus articulado – 18,5m	141	1,84 ^[2]

Fonte: [1] – Valores atualizados do ano 2007 para o ano 2018 (Shladover, et al., 2007); [2] – Valor atualizado do ano 2008 para o ano 2018 (Wikipédia, S.d.);

Relativamente aos custos de construção, apenas foi possível recolher os custos associados ao sistema em Douai, França, de valor igual a 4,66M€/km.

3.4.5. Vantagens e Desvantagens

Apesar de o sistema Phileas não se encontrar mais no mercado dos transportes, o SGMagn continua a ser desenvolvido. Assim sendo, torna-se importante salientar quais as vantagens e desvantagens deste sistema de transporte, que se encontram detalhadas no **Quadro 3.17**.

Quadro 3.17 – Vantagens e desvantagens do sistema guiado magnético

Vantagens		Desvantagens	
✓	Insensível face às condições climáticas; [a]	×	Sensível a outros campos magnéticos; [b]
✓	Boa aproximação às estações, melhorando a acessibilidade no embarque e desembarque de passageiros;	×	O campo magnético do sistema pode interferir com outros sistemas eletrónicos;
✓	Grande flexibilidade, podendo conduzir em diferentes modos;	×	Requer uma modificação na infraestrutura para a sua implementação;
✓	Elevada velocidade comercial;	×	Os imanes devem estar devidamente colocados; [c]
		×	Problemas de segurança; [d]
		×	Sistema de guiamento muito complexo;
		×	A existência de muitos cruzamentos pode ser um ponto conflituoso;

[a] – Como os imanes estão embutidos no pavimento, o SGMagn torna-se insensível à luz e às condições climáticas (Tan, et al., 2009).

[b] – A presença de objetos metálicos pode interferir no campo magnético (Tan, et al., 2009).

[c] – A implementação dos imanes deve ser realizada com bastante precisão, caso contrário existirá uma imprecisão na deteção da posição do veículo (Tan, et al., 2009).

[d] – O incumprimento das normas de segurança mínimas exigidas e a falta de fiabilidade do sistema tiveram como consequência o encerramento da empresa de produção do sistema Phileas (Bentley, et al., 2016) (Smiler (b), S.d.).

3.5. Análise comparativa dos sistemas de transporte convencionais e não convencionais em zona urbana

No seguimento da exposição de várias características dos sistemas de transporte não convencionais e de uma análise detalhada das vantagens e desvantagens de cada sistema de transporte, torna-se agora promissor efetuar uma comparação entre os sistemas de transporte não convencionais, analisados no presente Capítulo 3, e os sistemas de transporte convencionais, analisados no Capítulo 2. Com esta análise pretende-se comparar de uma forma rápida e quantitativa vários sistemas de transporte através de várias características analisadas anteriormente.

Para tal, foram criados dois quadros distintos, onde estão dispostos os vários sistemas de transporte com as correspondentes características destacadas para análise. No **Quadro E.1**, presente no **Anexo E**, são sintetizadas as características relacionadas com o tipo de veículo que cada sistema possui. Estas características dizem respeito ao tipo de energia utilizada pelo veículo, à capacidade média do veículo e ao custo do material circulante. Analisando o quadro referente ao tipo de veículo, é possível constatar que um veículo movido a eletricidade tem um custo de aquisição muito mais elevado que um veículo movido a diesel, segundo veículos com a mesma capacidade. Esta diferença de custo de aquisição de material circulante é ainda mais destacada para o caso dos SGCI, uma vez que, possuem uma tecnologia bastante avançada por terem características de um sistema ferroviário, através do seu guiamento via carril intermédio, e características de um sistema rodoviário, através da sua tração pneumática.

No **Quadro F.1**, presente no **Anexo F**, estão resumidas as características referentes à operação e ao tipo de infraestrutura que cada sistema de transporte consagra. Deste modo, são destacadas as características relacionadas com o sistema de guiamento, a dualidade rodoferroviária, a velocidade comercial, a largura das duas vias, o raio de giração, a pendente máxima admissível e o custo de construção. Dentro destas características é importante destacar que a velocidade comercial é um parâmetro bastante instável, não sendo possível, nem correto efetuar uma comparação entre sistemas via este parâmetro. Este parâmetro varia consoante a distância entre estações, as propriedades dos veículos utilizados (velocidade, aceleração, entre outros), a taxa de segregação da via em relação ao restante tráfego automóvel, o número de interseções existentes na via, entre outros fatores que influenciam a velocidade comercial e que variam em cada projeto. No caso do sistema de autocarros convencional, do sistema troleibus e do sistema ferroviário, foi recolhida uma velocidade comercial média padrão, indicada pelo IMTT (2011), dependendo do tipo de via, tornando a análise mais correta.

Continuando a análise do **Quadro F.1** é possível observar que o custo de construção de um sistema guiado é muito superior ao custo de construção de um sistema não guiado, existindo uma maior diferença para com os sistemas guiados via carril.

Nos seguintes capítulos será realizada uma análise qualitativa a estes sistemas de transporte convencionais e não convencionais, onde se irá tomar como base os dados recolhidos nos Capítulos 2 e 3, e que estão sintetizados nos **Quadros E.1** e **F.1**.

4. METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

No presente Capítulo 4 será elaborada uma exposição de vários métodos que podem ser aplicados numa avaliação de várias alternativas. Em primeiro lugar, no subcapítulo 4.1., serão apresentados vários instrumentos de análise existentes e serão destacados quais os mais utilizados no sector do planeamento de transportes. No subcapítulo 4.2., será selecionado o método que servirá como base para as análises efetuadas nos Capítulos 5 e 6. Seguidamente, no subcapítulo 4.3., serão expostas diversas variantes existentes do método escolhido, para que, no subcapítulo 4.4., sejam explicadas as suas metodologias.

4.1. Instrumentos de análise na avaliação de sistemas

No momento da avaliação de projetos, programas ou sistemas, existem vários instrumentos de análise de apoio à decisão. O Manual Técnico II, concebido pelo Observatório do QREN (2013), enumera os seguintes instrumentos possíveis, para a avaliação de sistemas:

- Avaliação do impacto de género;
- Análise custo-benefício;
- *Benchmarking* (Avaliação comparativa de desempenho);
- Análise custo-eficácia;
- Avaliação do impacto económico;
- Avaliação de impacte ambiental;
- Avaliação ambiental estratégica;
- Análise multicritério;
- Painéis de peritos;

Todos estes instrumentos podem ser aplicados numa avaliação de projetos de forma complementar. No entanto, segundo Macura et al (2011), dentro dos métodos de avaliação de projetos existentes, os mais usados no planeamento de transportes, na União Europeia, é a análise custo-benefício (ACB) e a análise multicritério (AMC).

Segundo a definição de Barfod, et al (2014), o objetivo de uma ACB é o de comparar várias alternativas, através dos seus custos e benefícios. No entanto, todos os critérios avaliados têm de estar à mesma escala de unidades, mais concretamente numa escala monetária, onde todos os custos, benefícios e parâmetros avaliados têm de ser convertidos a unidades de dinheiro. Para uma ACB é necessário, por exemplo, que exista um custo associado ao tempo de trajeto, à emissão de gases, ao número de transbordos efetuados, à poluição, aos acidentes provocados ou ao congestionamento. Esta análise provoca um grande impacto ao visualizador, uma vez que, é possível observar o custo total de um projeto, com todos os benefícios e parâmetros a serem convertidos para unidades monetárias. Por outro lado, torna-se bastante complicado converter todos os parâmetros a avaliar para custos.

A AMC tem como objetivo avaliar várias hipóteses, através de vários critérios, que não necessitam de estar à mesma escala de unidades. Além disso, este tipo de análise incentiva à participação do decisor para definir que critérios têm mais importância para a sua análise, e assim, fazer variar os pesos definidos para cada critério (Dudek, et al., 2018). Como inconvenientes da AMC, destaca-se o facto de ser complicado definir os pesos a atribuir aos critérios e o facto de o método não avaliar de uma forma absoluta as alternativas, apenas as compara, não existindo um valor final relativo ao investimento de uma alternativa (Barfod, et al., 2014).

Devido ao número elevado de sistemas de transporte que se pretende analisar, optou-se por efetuar uma AMC nestes sistemas, que serão analisados nos Capítulos 5 e 6. Esta AMC ajuda de uma forma mais simples a selecionar as melhores alternativas de sistemas de transporte. Em complemento, poderia ser efetuada uma ACB às alternativas com maior destaque, refletindo num maior rigor analítico.

4.2. Escolha do método de AMC

A AMC engloba um conjunto de métodos distintos para classificar as alternativas escolhidas pelo decisor. Deste modo, Wang, et al. (2017) classificou os diferentes métodos em três classes: métodos elementares, métodos compensatórios e métodos de prevalência (*outranking*). Na **Figura 4.1**, está presente um diagrama com as classes em questão, juntamente com os métodos existentes.

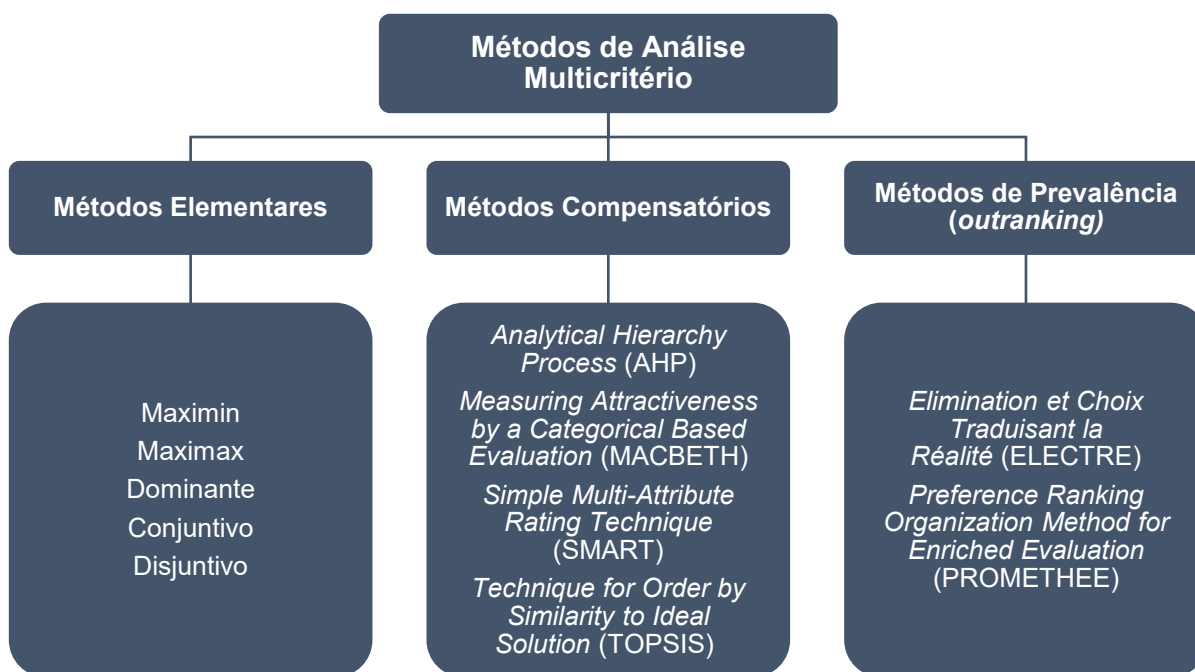


Figura 4.1 – Classificação dos métodos de análise multicritério. Adaptado de Wang, et al. (2017) e Guarini, et al. (2018).

Os métodos elementares consistem em eliminar todas as alternativas que não verifiquem determinados níveis de desempenho segundo os critérios estabelecidos pelo decisor. O decisor estabelece um limiar de satisfação/desempenho mínimo para cada critério, de modo a eliminar alternativas com níveis de desempenho inferior ao limite estabelecido (Fernandes, 2013).

Os métodos compensatórios têm como base a atribuição de uma “ponderação a cada critério e no cálculo de uma pontuação global para cada medida, sob a forma de uma média aritmética ponderada das pontuações atribuídas”, (Observatório do QREN, 2013), existindo compensação entre critérios, de modo a que uma má pontuação num critério possa ser compensada por uma boa pontuação noutro critério, refletindo numa boa classificação global.

Os métodos de prevalência (*outranking*) têm como base a comparação sucessiva entre as alternativas, consoante os critérios em avaliação, não sendo obtida uma pontuação global de cada alternativa, mas sim uma ordenação classificativa de alternativas (*ranking*) (Observatório do QREN, 2013).

Através da definição de cada conjunto de métodos, optou-se por escolher os métodos de prevalência, visto que, são mais rigorosos na classificação das alternativas, não tendo em conta o fator compensatório entre critérios. No entanto, estes métodos têm como inconveniente o facto de serem mais complexos que os compensatórios, devido à implementação de limiares de veto e de preferência.

Em complemento, tentaram-se averiguar quais os métodos mais utilizados para uma análise no sector do planeamento dos transportes, tendo-se encontrado um estudo realizado por Velasquez, et al (2013), onde são sumarizadas as vantagens e desvantagens dos vários métodos de AMC, bem como as suas áreas de aplicação. Assim sendo, os autores indicam que os métodos SMART, ELECTRE e PROMETHEE são os métodos mais utilizados na área do planeamento e análise dos transportes.

Para a presente dissertação, excluiu-se a utilização do método SMART, por pertencer ao grupo dos métodos compensatórios. Em relação aos métodos ELECTRE e PROMETHEE, Velasquez, et al. (2013) afirma que ambos os métodos são bastante similares. No entanto, o autor afirma que o método ELECTRE é um método mais complexo, mas que tem como vantagem o facto de ter em conta incertezas e ambiguidades na sua análise. Por outro lado, Velasquez, et al. (2013) indica que o método PROMETHEE é mais simples, mas que este tem como desvantagem a falta de clareza na atribuição de pesos aos critérios. Posto isto, optou-se por utilizar o método ELECTRE, na presente dissertação.

4.3. Avaliação e escolha das variantes do método ELECTRE

A família de métodos ELECTRE foi originada em França, no ano de 1965, concebida por Bernard Roy. Este método tem como objetivo eliminar as alternativas que são dominadas pelas demais, dentro dos limiares de preferência escolhidos (Sobral, et al., 2008). Desde a criação do método ELECTRE foram surgindo novas variantes, identificadas no **Quadro 4.1**.

Quadro 4.1 – Especificidades das variantes do método ELECTRE

Variantes	Ano	Problemática	Tipo de critério	Pesos
ELECTRE I	1968	Seleção	Simple	Sim
ELECTRE II	1973	Ordenação	Simple	Sim
ELECTRE III	1978	Ordenação	Pseudo	Sim
ELECTRE IV	1982	Ordenação	Pseudo	Não
ELECTRE IS	1985	Seleção	Pseudo	Sim
ELECTRE TRI	1992	Classificação	Pseudo	Sim

Fonte: (Sobral, et al., 2008);

Analisando as variantes identificadas, constata-se que existem várias diferenças entre estas, em relação à problemática, ao tipo de critério e à atribuição de pesos. Os métodos ELECTRE I e IS não permitem ordenar as alternativas, apenas indicam a melhor alternativa face ao problema. A ordenação de alternativas apenas é possível através dos métodos ELECTRE II, III e IV. Em relação ao tipo de critério, os métodos ELECTRE III, IV, TRI e IS são compostos por pseudo critérios, conseguidos através da imposição de limiares de preferência forte (p) e fraca (q). A utilização destes pseudo critérios tem como objetivo englobar “imprecisões e incertezas do processo de tomada de decisões” (Infante, et al., 2014), existindo um “crescimento linear da função no intervalo $0 \leq D_i(a, b) \leq p$ ”, (Sousa, et al., 2018), como ilustra a **Figura 4.2 (a)**. Por outro lado, os métodos ELECTRE I e II, utilizam verdadeiros critérios, onde não existem limiares de preferência, simplesmente “a função assume valor zero se a diferença de desempenho entre as alternativas for menor ou igual a zero e assume valor 1 se a diferença for maior que zero”, (Sousa, et al., 2018), como é apresentado pelo gráfico presente na **Figura 4.2 (b)**.

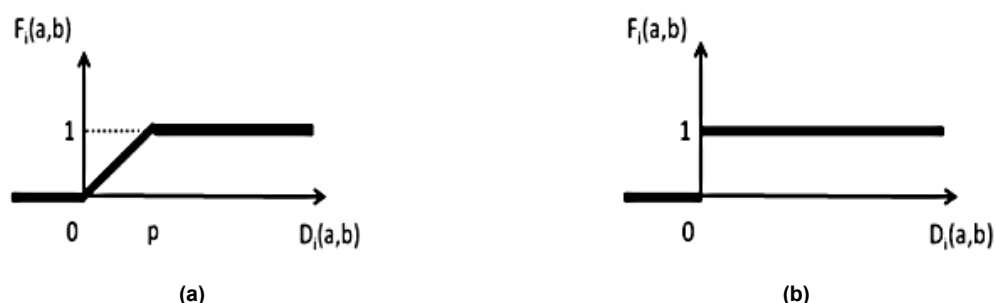


Figura 4.2 – Função característica de (a) um pseudo critério (Sousa, et al., 2018), (b) um verdadeiro critério (Sousa, et al., 2018)

Como último critério de diferenciação entre as várias variantes do método ELECTRE, está o critério relativo à atribuição de pesos aos critérios em avaliação, escolhidos pelo decisor. À exceção do método ELECTRE IV, todos os outros métodos têm a possibilidade de definir a importância relativa a cada critério em avaliação (Infante, et al., 2014).

Como existem diversas variantes do método ELECTRE, decidiu-se seleccionar as variantes mais oportunas para um estudo comparativo entre sistemas de transporte. Como o objetivo passará por classificar os vários sistemas de transporte, torna-se fundamental incluir uma análise com base na ordenação de classificação de alternativas, sendo que, apenas as variantes ELECTRE II, III e IV possuem esta especificação, excluindo assim as restantes. Num outro cenário, torna-se permissor incluir a ferramenta de pseudo critérios, de modo a não excluir drasticamente alternativas com resultados bastante próximos em relação à alternativa em comparação, excluindo assim a hipótese de utilização do método ELECTRE II. Conjungando estas duas imposições, restam como métodos o ELECTRE III e IV, com a diferença em que no primeiro é possível induzir ponderação nos critérios e no segundo não. Assim sendo, serão utilizados os métodos ELECTRE III e IV, de forma a garantir uma análise mais rica e diversificada.

4.4. Metodologia dos métodos ELECTRE III e IV

Neste subcapítulo será feita uma breve descrição da metodologia utilizada nos métodos ELECTRE III e IV. Dado que, os métodos ELECTRE III e IV assumem metodologias diferentes, estes serão examinados separadamente. Em cada método serão descritos todos os passos a efetuar até ao resultado final da ordenação das alternativas. Esta explicação dos métodos é bastante enriquecedora, fomentando uma melhor interpretação dos resultados que serão obtidos nos Capítulos 5 e 6, aquando da análise dos vários sistemas de transporte através dos métodos ELECTRE III e IV.

4.4.1. ELECTRE III

A exposição da metodologia do método ELECTRE III teve como base os artigos de Infante, et al. (2014), Pereira (2017) e Dias, et al. (2006). Sendo que, ao longo da metodologia serão expostas várias equações e condições, retiradas dos mesmos autores citados.

A exposição da metodologia será repartida nas seguintes fases:

- Notação básica e considerações iniciais;
- Índice de concordância parcial;
- Índice de concordância global;
- Matriz de discordância;
- Matriz de credibilidade;
- Ordenação das alternativas através do algoritmo de destilação;
- Matriz de dominância;

a) Notação básica e considerações iniciais

Em primeiro lugar, é fundamental introduzir a notação que será apresentada na explicação do método ELECTRE III. Esta notação encontra-se presente no **Quadro 4.2**.

Quadro 4.2 – Notação básica do método ELECTRE III

Notação	Significado
a_i	Alternativa i
g_j	Critério j
$g_j(a_i)$	Desempenho da alternativa i em relação ao critério j
w_j	Peso do critério
$c_{lk}(a_l, a_k)$	Grau de concordância parcial entre as alternativas l e k
$C(a_l, a_k)$	Grau de concordância global entre as alternativas l e k
$d_{lk}(a_l, a_k)$	Grau de discordância entre as alternativas l e k
$\sigma(a_l, a_k)$	Índice de credibilidade entre as alternativas l e k
p_j	Preferência estrita (forte) do critério j
q_j	Preferência fraca do critério j
v_j	Veto do critério j
λ	Nível de corte

Para a atribuição de valores aos limiares q , p e v , é estritamente necessário respeitar a condição apresentada na equação [4.1].

$$v_j \geq p_j \geq q_j \quad [4.1]$$

Os valores dos limiares são escolhidos pelo decisor, sendo que estes devem estar de acordo com as unidades utilizadas nos respetivos critérios.

Num outro contexto, é de extrema importância definir *a priori* qual o sentido de classificação que se pretende atribuir a cada critério, isto é, se ascendente ou descendente. No artigo de Dias, et al. (2006) consta um exemplo da aplicação do método ELECTRE III, aplicado à comparação entre modelos de carros. Neste exemplo, é definido em primeiro lugar a ordem de preferência na classificação dos valores atribuídos a cada critério, sendo que, no caso do critério associado ao custo do automóvel, quanto menor o custo deste, melhor. Desta forma, a ordem de preferência neste critério é descendente, com a melhor classificação atribuída ao carro com menor custo. Por outro lado, o critério respetivo à velocidade máxima tem uma ordenação ascendente.

A diferença entre a ordenação ascendente e descendente tem uma influência na aplicação do método ELECTRE, sendo necessário aplicar corretamente a metodologia consoante o tipo de ordenação em questão. Ao longo da explicação da metodologia ir-se-á exemplificar a aplicação do método para ambos os tipos de ordenação.

b) Índice de concordância parcial

O índice de concordância parcial avalia o grau de sobreclassificação de uma alternativa face a outra, para cada critério em avaliação. Por exemplo, dado as duas alternativas a e b , para um dado critério g_j , e segundo uma ordenação ascendente, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b ($g_j(b) - g_j(a)$), seja superior ao limiar p_j , diz-se que a alternativa b sobreclassifica fortemente a alternativa a . Por outro lado, se a diferença do desempenho entre as alternativas a e b for inferior ao limiar q_j , diz-se que a alternativa a é indiferente à alternativa b . Por fim, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b seja inferior ao limiar p_j , mas superior ao limiar q_j , assume-se que a alternativa b sobreclassifica fracamente a alternativa a .

Na equação [4.2], está definido o sistema de condições a abordar para a obtenção das matrizes de concordância parcial, segundo uma ordenação ascendente de preferências.

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) \geq p_j \\ 1, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) < q_j \\ \frac{p_j - g_j(b) + g_j(a)}{p_j - q_j}, & \text{se } q_j \leq g_j(b) - g_j(a) < p_j \end{cases} \quad [4.2]$$

Segundo a ordenação decendente, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b ($g_j(b) - g_j(a)$), seja superior ao limiar p_j , diz-se que a alternativa a sobreclassifica fortemente a alternativa b .

c) Índice de concordância global

Após se terem obtido as matrizes de concordância parcial, para cada critério g_j , é possível formar uma matriz de concordância global, onde se irá atribuir a importância que o decisor escolheu para cada critério, através dos pesos W_j .

Na equação [4.3], está apresentada a fórmula base para a obtenção da matriz de concordância global.

$$C(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \times c_j(a, b)}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad [4.3]$$

d) Discordância

O índice de discordância avalia o grau de discordância de uma alternativa face a outra, para cada critério em avaliação, ou seja, testa a afirmação de que uma alternativa b sobreclassifica uma alternativa a . Seguindo o exemplo das alternativas a e b , para um dado critério g_j e para uma ordenação de preferência ascendente, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b ($g_j(b) - g_j(a)$), seja inferior ao limiar p_j , a afirmação de que a sobreclassifica b não é rejeitada. Por outro lado, se a diferença do desempenho entre as alternativas a e b for superior ao limiar v_j , diz-se que a alternativa a nunca poderá ter uma classificação superior à alternativa b , mesmo se a alternativa a possuir um melhor desempenho em todos os outros critérios. Por fim, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b , seja inferior ao limiar v_j , mas superior ao limiar p_j , a afirmação de que a sobreclassifica b é fracamente rejeitada.

Na equação [4.4], está definido o sistema de equações a abordar para a obtenção das matrizes de discordância, segundo uma ordenação de preferência ascendente.

$$D_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) < p_j \\ 1, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) \geq v_j \\ \frac{-p_j - g_j(a) + g_j(b)}{v_j - p_j}, & \text{se } p_j \leq g_j(b) - g_j(a) < v_j \end{cases} \quad [4.4]$$

Segundo a ordenação decendente, caso a diferença do desempenho entre as alternativas a e b ($g_j(b) - g_j(a)$) seja superior ao limiar v_j , diz-se que a alternativa b nunca poderá ter uma classificação superior à alternativa a .

e) Matriz de credibilidade

O grau de credibilidade da relação de subordinação σ , expressa o ponto limite a que uma dada alternativa a tem uma classificação maior que uma dada alternativa b . Nesta relação são avaliadas as matrizes de concordância global, $C(a, b)$, e discordância, $D_j(a, b)$.

Caso não exista nenhum critério discordante, a relação de subordinação é igual ao índice de concordância global. Por outro lado, caso um índice de discordância, $D_j(a, b)$, face a um critério, for de valor igual a 1, o índice de credibilidade torna-se nulo, significando que não é credível que a tenha uma classificação maior que b . Num caso intermédio, quando o índice de discordância é superior ao índice de concordância, aquando da análise de desempenho de duas alternativas, para um dado critério, o índice de credibilidade $\sigma(a, b)$ toma um valor mais baixo do que o índice de concordância $C(a, b)$.

Na equação [4.5], é apresentado o sistema determinante para o cálculo do índice de credibilidade para uma dada alternativa a e b .

$$\sigma(a, b) = \begin{cases} C(a, b) \times \prod_{j=1}^n \frac{1 - D_j(a, b)}{1 - C(a, b)}, & \text{se } D_j(a, b) > C(a, b) \\ C(a, b), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.5]$$

f) Ordenação das alternativas através do algoritmo de destilação

Após o cálculo da matriz de credibilidade torna-se agora possível ordenar as alternativas consoante a sua classificação. Para tal, é implementado o algoritmo de destilação, apresentado no **Quadro 4.3**.

Quadro 4.3 – Algoritmo de destilação segundo ordenação ascendente e descendente, para o ELECTRE III

$\lambda_{m\acute{a}x}$	$m\acute{a}x\{Matrix \sigma(a, b)\}$
$S(\lambda_{m\acute{a}x})$	$S(\lambda_{m\acute{a}x}) = \beta + \alpha \lambda_{m\acute{a}x}, \beta = 0,3 \wedge \alpha = -0,15$
λ	$\lambda = m\acute{a}x\{Matrix \sigma, \forall \sigma(a, b) < \lambda_{m\acute{a}x} - S(\lambda_{m\acute{a}x})\}$
D	$Domina\c{c}\tilde{a}o(Matrix D) = \begin{cases} 1, & \text{se } \sigma(a, b) > \lambda \wedge \sigma(a, b) > \sigma(b, a) + S[\sigma(a, b)] \\ 0, & \text{caso contr\c{a}rio} \end{cases}$
Q	$Qualif\c{a}c\tilde{a}o i = Soma da linha i de D - Soma da coluna i de D$
$r_{descendente}$	$Posi\c{c}\tilde{a}o do rank = Maior valor de Q$
$r_{ascendente}$	$Posi\c{c}\tilde{a}o do rank = Menor valor de Q$

No processo apresentado, dá-se ênfase ao limiar de destilação $S(\lambda_{m\acute{a}x})$, onde os valores das incógnitas β e α estão padronizados, segundo os valores indicados no **Quadro 4.3**, para o caso do ELECTRE III.

Este algoritmo tem como base a eliminação de erros na ordenação das alternativas, através da existência de duas ordenações, uma ascendente e outra descendente. A diferença entre estas duas ordenações está na escolha da classificação Q , onde segundo a ordenação descendente retiram-se em primeiro lugar as classificações Q mais elevadas, ao qual correspondem as alternativas com melhor desempenho, até já não ser possível aplicar o algoritmo. E, segundo a ordenação ascendente retiram-se em primeiro lugar as classificações Q mais baixas, ao qual correspondem as alternativas com pior desempenho, até já não ser possível aplicar o algoritmo.

Em caso de empate nas classificações Q , é utilizado o algoritmo de destilação somente com as alternativas empatadas. Sendo que, o maior valor Q assume a melhor posição do *rank*, em relação às restantes alternativas empatadas, segundo a ordenação descendente, e o menor valor Q assume a pior

posição no *rank*, em relação às alternativas empatadas, segundo a ordenação ascendente. Caso as alternativas continuem empatadas, consideram-se que estas possuem a mesma classificação entre si.

g) Matriz de dominância

Com as duas ordenações completas é possível, finalmente, obter uma ordenação final das alternativas. Salienta-se que, as alternativas podem apresentar posições de classificação diferentes, em relação aos dois métodos de ordenação. Deste modo, é através das posições de cada alternativa, associadas a cada tipo de ordenação, que se completa o método ELECTRE III, de acordo com as condições apresentadas no **Quadro 4.4**.

Quadro 4.4 – Metodologia classificativa para ordenação final das alternativas

	Ordenação descendente	Ordenação ascendente	Ordenação final	
aPb (domina)	$r_a > r_b$	$r_a > r_b$	aP^+b (domina)	bP^-a (dominada)
	$r_a = r_b$	$r_a > r_b$		
	$r_a > r_b$	$r_a = r_b$		
aIb (indiferente)	$r_a = r_b$	$r_a = r_b$	I	I
aRb (incomparável)	$r_a > r_b$	$r_a < r_b$	R	R
	$r_a < r_b$	$r_a > r_b$		

Em resumo, após o resultado das posições das alternativas, segundo a ordenação ascendente e descendente, é necessário comparar as posições das alternativas nas duas ordenações, de modo a atribuir uma posição única. Por exemplo, dadas duas alternativas a e b , se a primeira alternativa ficar na primeira posição e a segunda alternativa ficar na segunda posição, em ambas as ordenações, diz-se que, a alternativa a domina a alternativa b , ou seja, é preferível em relação à segunda alternativa. Por outro lado, se a alternativa a tiver a primeira posição segundo a ordenação descendente, e a segunda posição segundo a ordenação ascendente, assume-se que, as alternativas a e b são incomparáveis. A matriz de dominância é o resultado da ordenação final do conjunto de alternativas.

4.4.2. ELECTRE IV

O método ELECTRE IV é baseado no método ELECTRE III, sendo que, a sua única diferença está na não implementação das ponderações, ou pesos, aos diversos critérios. Assim, na sua metodologia não são abordados os temas da concordância e discordância entre alternativas, sendo abordado diretamente o tema da credibilidade entre as alternativas em estudo.

A exposição da metodologia do método ELECTRE IV foi baseada no estudo de Freitas, et al. (2004), Pereira (2017) e Dias, et al. (2006), e foi dividida nas seguintes 4 etapas:

- Notação básica e considerações iniciais;
- Análise de dados;
- Matriz de credibilidade;
- Ordenação das alternativas;

Ao longo das etapas serão apresentadas várias equações retiradas dos artigos de Freitas, et al. (2004) e Dias, et al. (2006).

a) Notação básica e considerações iniciais

A notação básica essencial para um melhor entendimento do método ELECTRE IV está presente no **Quadro 4.5**.

Quadro 4.5 – Notação básica para implementação do método ELECTRE IV

Notação	Significado
a_i	Alternativa i
g_j	Critério j
$g_j(a_i)$	Desempenho da alternativa i em relação ao critério j
m	Número total de critérios
$m_p(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é estritamente preferido a a_k
$m_q(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é fracamente preferido a a_k
$m_i(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é indiferente a a_k
$m_o(a_l, a_k)$	Número de critérios para os quais a_l é exatamente igual a a_k
S_q	Quase Dominância
S_c	Dominância Canónica
S_p	Pseudo Dominância
S_s	Subdominância
S_v	Dominância de veto
$\sigma(a_l, a_k)$	Índice de credibilidade entre as alternativas l e k
p_j	Preferência estrita (forte) do critério j
q_j	Preferência fraca do critério j
v_j	Veto do critério j
λ	Nível de corte

Tal como no método ELECTRE III, a condição do grau de importância dos limiares, equação [4.1], também tem de ser respeitada. Por outro lado, no presente método ELECTRE IV, é imposta uma nova condição relacionada com o número de critérios m_j , consoante o grau de classificação. Esta condição representada segundo a equação [4.6], intui que a soma de todos os graus de classificação m_j tem de ser igual ao número total de critérios.

$$m = m_p(a, b) + m_p(b, a) + m_q(a, b) + m_q(b, a) + m_i(a, b) + m_i(b, a) + m_o \quad [4.6]$$

Por fim, salienta-se que, tal como abordado no caso do ELECTRE III, é necessário ter em conta se a ordenação das preferências, em cada critério, é ascendente ou descendente.

b) Análise de dados

A primeira etapa para a execução do método ELECTRE IV passa por classificar e contabilizar o número de critérios para o qual uma dada alternativa se destaca em relação a outra. A sua contabilização é feita através do enquadramento do desempenho entre as alternativas, em relação aos limiares p , q , e em relação ao ponto de referência 0, para todos os critérios em avaliação. Desta forma, são criadas 4

condições diferentes (m_p, m_q, m_i e m_o), consoante o enquadramento do desempenho. Realça-se que, a explicação abordada será para o caso de uma ordenação de preferência ascendente para com um par de alternativas a e b .

A primeira condição (m_p) indica o número de critérios para os quais a é estritamente preferida a b , e vice-versa. Esta ocorre quando a diferença do desempenho entre as alternativas é superior ao limiar de preferência estrita. Sendo que, esta condição é traduzida pelas equações [4.7] e [4.8].

$$m_p(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) > p_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.7] \quad m_p(b, a) = \begin{cases} 1, & \text{se } g_j(b) - g_j(a) > p_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.8]$$

A segunda condição (m_q) indica o número de critérios para os quais a é fracamente preferida a b , e vice-versa. Esta acontece quando a diferença do desempenho entre as alternativas é superior ao limiar de preferência fraca, mas inferior ao limiar de preferência estrita. Sendo que, esta condição é traduzida pelas equações [4.9] e [4.10].

$$m_q(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.9] \quad m_q(b, a) = \begin{cases} 1, & \text{se } q_j < g_j(b) - g_j(a) \leq p_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.10]$$

A terceira condição (m_i) indica o número de critérios para os quais a é indiferente a b , e vice-versa. Tal pressuposto acontece quando a diferença do desempenho entre as alternativas é inferior ao limiar de preferência fraca, mas superior a 0. Esta condição é traduzida pelas equações [4.11] e [4.12].

$$m_i(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq q_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.11] \quad m_i(b, a) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 < g_j(b) - g_j(a) \leq q_j, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.12]$$

A quarta condição (m_o) indica o número de critérios para os quais a é exatamente igual a b . Esta relação ocorre quando a diferença do desempenho entre as alternativas é exatamente igual a 0. Sendo que, esta condição é traduzida pela equação [4.13].

$$m_o = \begin{cases} 1, & \text{se } g_j(a) - g_j(b) = 0, \forall j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [4.13]$$

c) Matriz de credibilidade

À semelhança do método ELECTRE III, o método ELECTRE IV também se rege através de uma matriz de credibilidade. Não obstante, para definir esta matriz é necessário, em primeiro lugar, definir as seguintes matrizes de sobreclassificação: S_q – Quase Dominância, S_c – Dominância Canónica, S_p – Pseudo Dominância, S_s – Subdominância, S_v – Dominância de veto. Estas matrizes de sobreclassificação servem para identificar o grau de sobreclassificação entre alternativas, tendo como base as condições m , definidas anteriormente. Assim sendo, serão apresentadas as condições a ter em conta para estimar o grau de sobreclassificação entre alternativas.

Em primeiro lugar é importante salientar que existe uma ordem aquando da classificação das alternativas consoante a sua dominância. A classificação de dominância de veto contém todas as outras sobreclassificações, tornando-se a mais rica de todas. Por outro lado, a classificação de quase dominância está contida em todas as outras sobreclassificações. Deste modo, a classificação de quase dominância deve ser a primeira a ser abordada, seguida da classificação de dominância canónica, da pseudo dominância, da subdominância e, por fim, da dominância de veto. Na equação [4.14], está presente a condição que reflete a posição de cada sobreclassificação.

$$S_q \subset S_c \subset S_p \subset S_s \subset S_v \quad [4.14]$$

A sobreclassificação de quase dominância (S_q) é a primeira sobreclassificação a ser abordada. Esta indica que uma alternativa b apenas tem uma relação de quase dominância para com uma alternativa a , se respeitar a condição exposta pelo sistema de equações [4.15].

$$bS_q a \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a, b) + m_q(a, b) = 0, & e \\ m_i(a, b) < m_i(b, a) + m_q(b, a) + m_p(b, a) \end{cases} \quad [4.15]$$

Em seguida, uma alternativa b tem uma relação de dominância canónica (S_c) para com uma alternativa a , se respeitar a condição exposta pelo sistema de equações [4.16].

$$bS_c a \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a, b) = 0, \\ m_q(a, b) \leq m_q(b, a), & e \\ m_q(a, b) + m_i(a, b) \leq m_i(b, a) + m_q(b, a) + m_p(b, a) \end{cases} \quad [4.16]$$

Numa outra sobreclassificação, uma dada alternativa b tem uma relação de pseudo dominância para com uma alternativa a , se respeitar a condição exposta pelo sistema de equações [4.17].

$$bS_p a \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a, b) = 0, & e \\ m_q(a, b) < m_q(b, a) + m_p(b, a) \end{cases} \quad [4.17]$$

Seguidamente, uma alternativa b tem uma relação de subdominância para com uma alternativa a , se respeitar a condição exposta pelo sistema de equações [4.18].

$$bS_s a \Leftrightarrow \{m_p(a, b) = 0 \quad [4.18]$$

Por fim, uma alternativa b tem uma relação de dominância de veto para com uma alternativa a , se respeitar a condição exposta pelo sistema de equações [4.19].

$$bS_v a \Leftrightarrow \{m_p(a, b) = 0 \vee bS_v a \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a, b) = 1, \\ m_p(b, a) \geq \frac{m}{2}, & e \\ g_j(b) - g_j(a) \geq v_j \end{cases} \quad [4.19]$$

Com todas as sobreclassificações definidas, para cada par de alternativas, é possível criar a matriz de sobreclassificação final. Para se obter a matriz de credibilidade $\sigma(a, b)$, é necessário converter as sobreclassificações em pontuações numéricas. Esta conversão é apresentada no sistema de equações [4.20].

$$\sigma(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{se } aS_q b \\ 0,8, & \text{se } aS_c b \\ 0,6, & \text{se } aS_p b \\ 0,4, & \text{se } aS_s b \\ 0,2, & \text{se } aS_v b \\ 0, & \text{se não houver relação de subordinação } \{S_q, S_c, S_p, S_s, S_v\} \text{ para } \{a, b\} \end{cases} \quad [4.20]$$

d) Ordenação das alternativas

A ordenação das alternativas para o caso do ELECTRE IV é bastante similar ao caso do ELECTRE III, sendo que a única diferença está na definição dos valores das incógnitas β e α . Para o caso do ELECTRE IV foi definido que $\beta = 0,1$ e $\alpha = 0$. Em resumo, foi construído o **Quadro 4.6**, onde estão presentes todas as etapas para o processo de destilação a aplicar para o método ELECTRE IV.

Quadro 4.6 – Algoritmo de destilação segundo ordenação ascendente e descendente, para o ELECTRE IV

$\lambda_{m\acute{a}x}$	$m\acute{a}x\{Matrix \sigma(a, b)\}$
$S(\lambda_{m\acute{a}x})$	$S(\lambda_{m\acute{a}x}) = \beta + \alpha\lambda_{m\acute{a}x}, \beta = 0,1 \wedge \alpha = 0$
λ	$\lambda = m\acute{a}x\{Matrix \sigma, \forall \sigma(a, b) < \lambda_{m\acute{a}x} - S(\lambda_{m\acute{a}x})\}$
D	$Domina\c{c}\tilde{a}o(Matriz D) = \begin{cases} 1, & \text{se } \sigma(a, b) > \lambda \wedge \sigma(a, b) > \sigma(b, a) + S[\sigma(a, b)] \\ 0, & \text{caso contr\acute{a}rio} \end{cases}$
Q	$Qualifica\c{c}\tilde{a}o i = Soma da linha i de D - Soma da coluna i de D$
$r_{descendente}$	$Posi\c{c}\tilde{a}o do rank = Maior valor de Q$
$r_{ascendente}$	$Posi\c{c}\tilde{a}o do rank = Menor valor de Q$

Todas as outras considerações abordadas para o caso do método ELECTRE III são válidas para o método ELECTRE IV, bem como a metodologia de ordenação das alternativas.

5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL INTERESSE DE SISTEMAS INOVADORES COM GUIAMENTO. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELECTRE III E IV

Neste capítulo será efetuada a aplicação dos métodos ELECTRE III e IV para uma análise dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3. Em primeiro lugar, no subcapítulo 5.1. será exposta a metodologia a aplicar nesta AMC. Seguidamente, serão apresentados vários estudos semelhantes ao que se pretende analisar, presentes no subcapítulo 5.2. De seguida, ir-se-á expor o caso teórico a aplicar ao modelo, no subcapítulo 5.3. No subcapítulo 5.4. ir-se-á expor e justificar a recolha de dados e a classificação das alternativas nos vários critérios a avaliar. Numa etapa *a priori* da execução dos métodos, será necessário estipular e calibrar os limiares e pesos, que integram o método ELECTRE, cuja abordagem será exposta no subcapítulo 5.5. Depois, será realizada a execução dos métodos e serão analisados os dados obtidos, precisamente no subcapítulo 5.6. Por último, no subcapítulo 5.7., será feita uma conclusão do capítulo de modo a sintetizar os pressupostos feitos e as soluções obtidas.

5.1. Metodologia

O objetivo desta análise passa por comparar os sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3, que já tenham sido testados. A esta análise serão introduzidos vários valores de procura de modo a observar a variação do desempenho classificativo dos sistemas de transporte.

Nesta AMC serão utilizados os métodos ELECTRE III e ELECTRE IV. No caso do ELECTRE III serão atribuídos 4 grupos de pesos para avaliar a sensibilidade do método. De seguida, será executado o método ELECTRE IV, que não considera o efeito dos pesos nos critérios para análise. Assim, obter-se-ão 5 soluções por cada cenário criado.

5.2. Estudos anteriores

Antes de iniciar a presente análise procuraram-se estudos na literatura cujo propósito passaria por efetuar uma análise multicritério, concretamente através do método ELECTRE, para a classificação de vários sistemas de transporte. Posto isto, dá-se destaque a 3 estudos de elevada importância para a presente análise: **Dudek, et al.** (2018), **Solecka** (2014) e **An** (2011).

Dudek, et al. (2018) compara vários sistemas de transporte, para uma linha de 15km, na cidade de Breslávia, na Polónia. Os autores utilizam os métodos ELECTRE III e IV, e o método AHP para comparar as seguintes 6 alternativas: a1 – Autocarro standard, em via banal; a2 – Autocarro articulado, em via banal; a3 – Autocarro standard, em via segregada; a4 – Autocarro articulado, em via segregada; a5 – Elétrico tradicional, com paragens a cada 500 metros; a6 – Elétrico de serviço rápido, com paragens a cada 700 metros. Além disso, os autores utilizam como critérios de análise os seguintes: tempo de espera; tempo de percurso; acessibilidade entre o cais e o veículo; conforto durante a viagem;

custo do material circulante; custo de construção, manutenção e exploração do sistema. Por fim, é avaliada a preferência do operador e do passageiro, tendo por efeito a existência de dois cenários, no que diz respeito à definição dos limiares e dos pesos para o método ELECTRE.

Solecka (2014) utiliza o método ELECTRE III para comparar a integração de novos sistemas de transporte, na cidade de Cracóvia, na Polónia. O autor visa comparar as seguintes 8 soluções para a rede de transportes na cidade: a0 – Sem alteração à rede; a1 – Integração de um comboio expresso juntamente com o serviço de autocarro; a2 – Integração de um comboio expresso com o serviço de autocarro e de elétrico; a3 – Integração do comboio expresso com o metro subterrâneo; a4 – Integração do comboio expresso com o elétrico; a5 – Integração de elétricos rápidos com o serviço de autocarros; a5a – Variante da a5, com integração de elétricos rápidos com elétricos tradicionais; a6 – Integração de dois sistemas de elétricos. Por outro lado, o autor tende a avaliar os seguintes critérios: tempo de trajeto; número de transbordos; taxa de ocupação dos veículos; impactos ambientais; nível de integração do sistema (coordenação de horários, tempo de transbordo, entre outros); segurança na viagem; nível de rentabilidade da linha; acessibilidade; custos de investimento. Numa outra ótica, o autor executou o método tendo em conta 5 visões distintas, estas que são: o operador, o gestor de transporte, o passageiro, o analista e outros participantes. Assim, Solecka, obteve 5 soluções diferentes, uma vez que, cada entidade estipulou pesos e limiares diferentes.

An (2011) analisa os sistemas de transporte à superfície que existem em França através do método ELECTRE III e IV. Nesta análise, são comparadas as seguintes 6 alternativas: a1 – Elétrico; a2 – Translohr; a3 – TVR; a4 – Civis (equivalente ao Irisbus); a5 – Troleibus; a6 – Autocarro articulado, em via própria. Estas alternativas são avaliadas de acordo com os seguintes critérios: capacidade anual da linha; frequência; velocidade comercial; ocupação da via pública; fiabilidade; acessibilidade; custo de investimento; custo de exploração anual; emissões de CO₂; imagem de inserção. Além disso, o autor elabora e disponibiliza a análise económica realizada para estimar os custos de exploração. Adicionalmente, são criados cenários onde se variam vários fatores com o intuito de influenciar os critérios, e assim, ver a variação da classificação das alternativas através do método ELECTRE.

Construiu-se o **Quadro 5.1** onde são expostas as similitudes e discrepâncias encontradas entre os estudos referidos e a análise que se pretende efetuar na presente dissertação. Após uma análise reforçada aos 3 estudos identificados, é possível concluir que o estudo de An (2011) é o que mais se assemelha à análise pretendida para a presente dissertação. O autor analisa sistemas de transporte, que também são analisados na presente dissertação e disponibiliza a análise económica realizada ao nível dos custos de exploração dos sistemas de transporte. Além disso, a criação de vários cenários e pesos é uma mais valia para a elaboração de uma análise, visto que procura testar o método em aplicação. Por outro lado, no estudo de An (2011) não são analisados os SGMec, nem o sistema Phileas ou o autocarro em via banal. Desta forma, tornar-se-á como base o estudo de An (2011), onde existirão várias alterações, devidamente justificadas.

Quadro 5.1 – Análise síntese de estudos anteriores para AMC e sua relação com o estudo que se pretende realizar

Fonte	Similitudes	Discrepâncias
Dudek, et al. (2018)	✓ Utilização de 3 métodos de análise hierárquica; ✓ Avaliação de alternativas de transporte tradicionais com diferentes veículos; ✓ Criação de dois cenários tendo em conta a visão do operador e do passageiro;	✗ Não são avaliados sistemas de transporte presentes no Capítulo 3, do presente estudo; ✗ Inexistência de critérios urbanísticos e ambientais; ✗ Custos de investimento e exploração estão no mesmo critério;
Solecka (2014)	✓ Análise de vários critérios, incluindo ambientais e de segurança; ✓ Existência de vários cenários, tendo em conta a entidade em questão;	✗ Vários sistemas de transporte numa alternativa; ✗ Ausência dos custos de exploração;
An (2011)	✓ Análise de vários sistemas de transporte, incluindo alguns já introduzidos no Capítulo 3, do presente estudo; ✓ Análise económica disponível para o cálculo dos custos de exploração; ✓ Criação de vários cenários; ✓ Execução de uma análise de sensibilidade, com pesos distintos;	✗ Agregação dos custos de material circulante aos custos de construção; ✗ Valores apresentados no estudo apenas se refletem ao local de estudo, que é França;

5.3. Exposição do caso teórico

De modo a ser possível analisar os sistemas de transporte criou-se um problema teórico, com o intuito de verificar o comportamento destes face a determinadas condições. Desta forma, é importante: definir um cenário base, com condições transversais a todos os cenários; expor as alternativas a comparar; explicar os cenários criados; e apresentar os critérios a avaliar na AMC.

5.3.1. Cenário base

Para a construção deste problema foi obrigatório estipular algumas condições para futuros cálculos e análises, nomeadamente no que diz respeito à análise económica dos custos de exploração dos vários sistemas de transporte. Assim sendo, as condições base a ter em conta são as seguintes:

- Extensão da linha por direção: 15km;
- Inclinação máxima do trajeto: 5%;
- Número de estações: 30 estações no total;
- Número de máquinas de venda de bilhetes: 2 máquinas por estação;
- Número de subestações: 1 a cada 1,5km de via com catenária, para os veículos elétricos;

- Número de mudanças de via: 10 no total, para os veículos com carril-guia, à exceção do TVR, que tem a possibilidade de circular sem guiamento, não existindo mudanças de via;
- Número de dias de funcionamento: 253 dias úteis, 52 sábados e 60 domingos e feriados;
- Número de horas de funcionamento: 20 horas nos dias úteis, 19 horas nos sábados e 18 horas nos domingos e feriados;
- Número de horas de ponta diárias: 4 horas nos dias úteis;
- Taxa de ocupação dos veículos: 85%;
- Taxa de reserva: 10% em relação ao número de veículos com o tempo de batimento;
- Tempo de preparação do veículo: 40 minutos;
- Tempo de batimento em cada terminal: 10 minutos;

Realça-se que, muitos destes dados foram tomados do estudo de An (2011), à exceção da inclinação máxima existente e da taxa de ocupação por veículo. Esta última foi retirada do estudo de Solecka (2014).

5.3.2. Alternativas a comparar

De modo a elaborar uma análise o mais diversificada possível tentaram-se encontrar várias alternativas de sistemas de transporte, algumas não previstas nos estudos anteriormente referidos. Além disso, a escolha destas alternativas teve também como base a disponibilidade da aquisição de dados fundamentais, como o custo do material circulante.

As alternativas (ai) a comparar estão resumidas no **Quadro 5.2**, onde se encontram presentes os vários sistemas de transporte, juntamente com o tipo de veículo em estudo e com a fonte de energia de cada veículo. Realça-se que, o sistema ART está sublinhado, uma vez que, apenas será analisado no Capítulo 6. No entanto, no presente Capítulo 5, serão apresentados os dados referentes a este sistema, para futura análise.

Quadro 5.2 – Alternativas a analisar

Alternativa (ai)	Categoria	Sistema de transporte	Tipo de veículo	Fonte de energia
a1	Rodoviário tradicional	Autocarro tradicional em via banal	Autocarro articulado	Diesel
a2		Autocarro tradicional em via própria	Autocarro biarticulado	Diesel
a3		Troleibus em via própria	Troleibus articulado	Elétrico
a4	Ferrovário tradicional	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico 32m	Elétrico
a5	Novos sistemas guiados	SGMec	Autocarro articulado	Diesel
a6		SGCI – TVR	TVR	Elétrico
a7		SGCI – Translohr	Translohr STE4	Elétrico
a8		SGO – Irisbus	Autocarro articulado – Irisbus Citelis 18	Diesel
a9		SGMagn – Phileas	Autocarro biarticulado – 24,5m	GLP
<u>a10</u>	<u>Futuros sistemas guiados</u>	<u>SGO – ART</u>	<u>ART – 3 carruagens</u>	<u>Elétrico</u>

Realçando a diferenciação com o estudo de An (2011), o autor escolheu as seguintes 6 alternativas: autocarro articulado em via própria, troleibus em via própria, elétrico, Translohr, TVR e Civis (equivalente ao Irisbus). Por conseguinte, na presente dissertação serão analisados também o autocarro articulado em via banal, o SGMec, o Phileas e será analisado, à parte, o sistema ART, como possível futuro transporte.

5.3.3. Cenários criados que fomentam a análise

Uma vez que este estudo se enfoca numa análise classificativa de sistemas de transporte, considera-se fundamental perceber o desempenho de cada alternativa face a várias condições. Posto isto, foram criados 4 cenários, onde são impostos valores de procura horária, por direção, para a linha em estudo, para assim, ser possível observar a variação da classificação dos vários sistemas de transporte consoante a procura imposta. Estes cenários encontram-se presentes no **Quadro 5.3**, juntamente com os valores de procura horária por direção. Salienta-se que, estes valores foram baseados num documento do IMTT (2011), onde divulgam os limites da capacidade da linha por sistema de transporte.

Quadro 5.3 – Cenários criados para análise dos sistemas de transporte

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Procura por direção (Passageiros/hora)	1000	2000	3000	4000

Em comparação, An (2011) cria os seguintes cenários:

- **Cenário 1** – Intervalo entre circulações: 5 minutos. Velocidade comercial: 20km/h. Distância entre estações: 500m. Capacidade anual variada.
- **Cenário 2** – Intervalo entre circulações adaptado ao sistema de transporte. Velocidade comercial: 18km/h. Distância entre estações: 333m. Capacidade anual de cerca de 10 milhões de passageiros por ano.
- **Cenário 3** – Intervalo entre circulações: 2 minutos. Velocidade comercial: 25km/h. Distância entre estações: 500m. Capacidade anual variada.
- **Cenário 4** – Intervalo entre circulações adaptado ao sistema de transporte. Velocidade comercial: 18km/h. Distância entre estações: 333m. Capacidade anual de cerca de 5 milhões de passageiros por ano.

No entanto, considerou-se mais oportuno criar apenas uma variável nos cenários, de modo a ser possível observar com clareza a variação da classificação dos sistemas de transporte. Além disso, o intervalo entre circulações será calculado com base na procura estipulada e depois será verificado se este é ou não viável, consoante os valores padronizados pelo IMTT (2011).

5.3.4. Critérios a avaliar na análise multicritério

Os critérios a serem avaliados nesta análise foram baseados nos critérios definidos por An (2011), tendo sido realizadas algumas alterações. No **Quadro 5.4**, estão presentes os critérios escolhidos para análise, que estão agrupados pelas seguintes 3 categorias: desempenho do sistema, custos

associados e aspetos ambientais e urbanísticos. No quadro em questão, estão também assinalados os critérios que An (2011) teve em conta, através de um asterisco.

Quadro 5.4 – Critérios a ter em conta na AMC

Categoria	Critérios a avaliar	Nomenclatura (gj)
Desempenho do sistema	Acessibilidade*	g1
	Intervalo entre circulações*	g2
	Fiabilidade*	g3
	Flexibilidade	g4
	Pontualidade*	g5
	Segurança	g6
Custos associados	Custo do material circulante	g7
	Custo de construção	g8
	Custo de exploração*	g9
Aspetos ambientais e urbanísticos	Atratividade	g10
	Emissões de gases*	g11
	Inserção no espaço urbano*	g12
	Ruído	g13

Em relação à categoria do desempenho do sistema, An (2011) também considerou como critérios: a capacidade da linha, a velocidade comercial e a inserção no espaço urbano. A capacidade da linha, como referido anteriormente, será obtida através da procura horária nos diferentes cenários criados. No que diz respeito à velocidade comercial, esta ir-se-á manter como constante ao longo dos vários cenários, sendo avaliada indiretamente no critério do intervalo entre circulações. Por último, a inserção no espaço urbano será transferida para a categoria dos aspetos ambientais e urbanísticos. Adicionalmente, serão implementados os critérios relativos à flexibilidade e segurança dos transportes. Estes dois critérios foram baseados no artigo de Solecka (2014) e no documento do IMTT (2011).

Na secção dos custos associados, decidiu-se segregar o custo de investimento em custo de construção da infraestrutura e custo do material circulante, ao contrário do estudo de An (2011) que considerou globalizado o custo de investimento. Tal como foi explicado no Capítulo 2, o custo de investimento consagra o custo do material circulante e o custo de construção da infraestrutura, em €/km. Como se irá variar o número de veículos consoante a procura imposta, o custo de investimento não traduz num bom parâmetro para avaliar as várias alternativas, visto que este só depende da extensão da via, e que nesta análise, esta se irá manter constante. Logo, caso se considerasse o custo de investimento globalizado, não existiria nenhuma alteração nestes custos em relação à variação dos cenários impostos, o que não reflete a realidade.

Em relação à categoria dos aspetos ambientais e urbanísticos, foram implementados os critérios relacionados com a atratividade e com o ruído. Os dados recolhidos para estes critérios têm como base um estudo elaborado pela NZ Transport Agency (2017).

5.4. Estabelecimento e cálculo dos critérios a avaliar

5.4.1. Acessibilidade (g1)

No critério da acessibilidade será avaliada a facilidade no embarque e desembarque dos passageiros em relação aos veículos. A sua avaliação teve como critério o de identificar se o sistema de transporte é guiado ou não, uma vez que, como referido anteriormente, o facto de um sistema de transporte ser guiado incrementa a precisão na aproximação ao cais das estações e, por consequência, facilita o embarque e desembarque dos passageiros, ajudando a reduzir o tempo de paragem nas estações (Britpave, S.d.). No **Quadro 5.5** estão classificados os diferentes transportes, tendo-se atribuído o valor de 1 aos transportes com guiamento e 0 aos transportes sem guiamento.

Quadro 5.5 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua acessibilidade

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Guiamento	Acessibilidade (0 ou 1)
a1	Autocarro tradicional em via banal	Não	0
a2	Autocarro tradicional em via própria	Não	0
a3	Troleibus em via própria	Não	0
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Sim	1
a5	SGMec	Sim	1
a6	SGCI – TVR	Sim	1
a7	SGCI – Translohr	Sim	1
a8	SGO – Irisbus	Sim	1
a9	SGMagn - Phileas	Sim	1
a10	SGO - ART	Sim	1

5.4.2. Intervalo entre circulações (g2)

O intervalo entre circulações está relacionado com a capacidade do veículo e com a capacidade da linha, que será imposta pela procura nos vários cenários. Deste modo, o intervalo entre circulações pode ser traduzido pela equação **[5.1]**.

$$IC = \frac{60 \times Cv \times tx_{ocup}}{P} \quad [5.1]$$

Onde, IC : Intervalo entre circulações (minutos);
 P : Procura gerada (número de passageiros/hora/direção);
 Cv : Capacidade de um veículo (passageiros);
 tx_{ocup} : Taxa de ocupação (%);

No **Quadro 5.6**, estão apresentados os diversos tipos de veículos em análise, juntamente com a sua capacidade, em 4p/m². Destaca-se que, para o caso do ART, a capacidade do veículo foi estimada com base no elétrico, por não estarem disponibilizados valores referentes à capacidade do veículo ART, em 4p/m² (quatro pessoas por metro quadrado). Apenas foi possível encontrar artigos que indicam que a capacidade média está entre 250 e 300 passageiros, porém tal indicação depende do espaço ocupado por pessoa (Peter Newman, et al., 2018). Além disso, ambos os veículos têm o mesmo comprimento, logo num cenário pessimista pode-se aproximar o valor da capacidade do ART ao do elétrico com 3 carruagens.

Quadro 5.6 – Capacidade média de cada veículo, consoante o sistema de transporte

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Tipo de veículo	Comprimento [m]	Capacidade média do veículo [4p/m ²]
a1	Autocarro tradicional em via banal	Autocarro articulado	18	120
a2	Autocarro tradicional em via própria	Autocarro biarticulado	24	150
a3	Troleibus em via própria	Troleibus articulado	18	120
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico/Metro Ligeiro 32m	32	200
a5	SGMec	Autocarro articulado	18	120
a6	SGCI – TVR	TVR	24,5	131
a7	SGCI – Translohr	Translohr STE4	32	170
a8	SGO – Irisbus	Autocarro articulado – Irisbus Citelis 18	18	120
a9	SGMagn - Phileas	Autocarro biarticulado - Phileas	24,5	129
a10	SGO - ART	ART – 3 carruagens	32	200

Fonte: Valores recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados;

Os valores obtidos de intervalo entre circulações para cada alternativa e para cada cenário imposto, encontram-se disponíveis no **Quadro 5.7**. Estes valores foram arredondados por defeito, segundo um múltiplo de 0,5, de modo a garantir alguma margem de erro.

Quadro 5.7 – Intervalos entre circulações estimados nos diversos sistemas de transporte, ao longo dos cenários impostos

Alternativa (ai)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
a1	6	3	2	1,5
a2	7,5	3,5	2,5	1,5
a3	6	3	2	1,5
a4	10	5	3	2,5
a5	6	3	2	1,5
a6	6,5	3	2	1,5
a7	8,5	4	2,5	2
a8	6	3	2	1,5
a9	6,5	3	2	1,5
a10	10	5	3	2,5

Através dos valores de intervalo entre circulações, torna-se possível verificar se estes são viáveis ou não, para que seguidamente seja possível efetuar a sua avaliação. Assim sendo, estes valores de intervalos foram comparados com os limiares mínimos e máximos de intervalo de circulações em hora de ponta, estabelecidos pelo documento vigorado pelo IMTT (2011). Estes limiares encontram-se presentes no **Quadro 5.8**, sendo que, o único sistema de transporte com limiares distintos é o autocarro em via comum, visto que todos os outros se situam na categoria de transportes em via própria. De modo a simplificar a leitura, nos **Quadros 5.7, 5.8 e 5.9**, foram coloridas as células referentes aos valores que estão fora do limiar. A azul, encontram-se os valores que superam o limiar máximo e, a vermelho, encontram-se os valores que estão inferiores ao limiar mínimo.

Quadro 5.8 – Limiares estabelecidos pelo IMTT para o intervalo entre circulações em hora de ponta

Intervalo de circulações em hora de ponta (min)		
Alternativa (ai)	Mínima	Máxima
a1	4	10
a2	2	6
a3	2	6
a4	2	6
a5	2	6
a6	2	6
a7	2	6
a8	2	6
a9	2	6
a10	2	6

Fonte: IMTT (2011);

Assim, serão classificados com um 1, os sistemas de transporte que tenham um valor de intervalo entre circulações dentro dos limiares estabelecidos, caso contrário, terão uma classificação de 0.

Quadro 5.9 – Classificação do intervalo entre circulações perante os vários sistemas de transporte

Alternativa (ai)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
a1	1	0	0	0
a2	0	1	1	0
a3	1	1	1	0
a4	0	1	1	1
a5	1	1	1	0
a6	0	1	1	0
a7	0	1	1	1
a8	1	1	1	0
a9	0	1	1	0
a10	0	1	1	1

Em complemento, definiu-se que o intervalo entre circulações, fora de hora de ponta, é sempre o dobro do tempo de intervalo entre circulações, em hora de ponta, tal como foi definido por An (2011). Além disso, frisa-se que não foram modificados os valores que não cumpriam a frequência normativa pelos seus limiares. Se um valor inferior ao limiar mínimo, a vermelho, fosse substituído pelo limiar mínimo, levaria a que existissem menos veículos que o estimado e logo não seria transportado o número de passageiros imposto pela procura definida nos cenários. Deste modo, admitiu-se que os custos de exploração são obtidos pelo intervalo entre circulações necessário para a procura imposta.

5.4.3. Fiabilidade (g3)

An (2011) induz que a fiabilidade de um transporte está relacionada com os anos de existência de um sistema de transporte e com o número de sistemas existentes. Além disso, o facto de um sistema de transporte ter sido interrompido, ou seja, um sistema ter encerrado operações, demonstra que este não é fiável. Deste modo, optou-se por utilizar o mesmo critério classificativo que An (2011).

No **Quadro 5.10**, encontram-se expostos os vários sistemas de transporte, juntamente com os anos de existência do sistema, o número de sistemas existente e se o sistema ainda existe ou não, em relação ao ano de 2020.

Quadro 5.10 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua fiabilidade

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Anos de existência do sistema	Sistemas existentes	Interrupção do sistema	Fiabilidade (0 a 9)
a1	Autocarro tradicional em via banal	>100 ^[1]	>100 ^[2]	Não	9
a2	Autocarro tradicional em via própria	45 ^[3]	>100 ^[4]	Não	9
a3	Troleibus em via própria	>100 ^[5]	>100 ^[5]	Não	9
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	>100 ^[6]	>100 ^[6]	Não	9
a5	SGMec	40 ^[7]	13 ^[7]	Não	8
a6	SGCI – TVR	19 ^[7]	1 ^[7]	Sim	7
a7	SGCI – Translohr	14 ^[7]	9 ^[7]	Não	8
a8	SGO – Irisbus	19 ^[7]	6 ^[7]	Não	8
a9	SGMagn - Phileas	11 ^[7]	0 ^[7]	Sim	7
a10	SGO - ART	0 ^[7]	0 ^[7]	Não	8

Fonte: [1] – (Martincar, S.d.); [2] – (SCI Verkehr GmbH, 2017); [3] – (Piccirillo, 2012); [4] – (Global BRT Data (a), S.d.); [5] – (Arias, 2016); [6] – (Train History (b), S.d.); [7] – Valores recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados;

A grande diferença entre os dados recolhidos e os dados presentes no documento de An (2011) resulta da atualização dos dados a nível mundial e não só a nível do país do estudo do autor, que foi França. Deste modo, foi adicionado o sistema de autocarro em via banal, o SGMec, o sistema ART e o sistema Phileas.

De seguida, procedeu-se à classificação dos sistemas em termos de fiabilidade, tendo em conta a abordagem de An (2011). Assim, foram classificados com um 9 o autocarro em via banal e em via própria, o troleibus e o elétrico, uma vez que, todos existem há muitos anos e existem muitos sistemas no mundo. Num outro cenário, classificaram-se com um 8 o Translohr, o SGO e o SGMec, sendo que o último enumerado não consta na análise de An (2011), visto que não existe em França. No entanto, este foi enquadrado nesta classificação devido aos seus anos de existência e a um bom número de sistemas existentes. Os sistemas TVR e Phileas foram classificados com um 7 porque a empresa fornecedora encerrou a produção destes veículos.

Por fim, é importante referir que o sistema ART ainda não está em funcionamento. Por conseguinte, a sua classificação teve como base o sistema Irisbus, uma vez que, ambos os sistemas possuem guiamento ótimo, que é um fator de semelhança relevante para a fiabilidade.

5.4.4. Flexibilidade (g4)

A flexibilidade nos transportes determina se um determinado modo de transporte tem a facilidade de mudar a sua rota ou fornecer um serviço “porta a porta”. Como já foi analisado no Capítulo 2, os sistemas ferroviários tradicionais são rígidos e os sistemas rodoviários são flexíveis, assegurando uma boa acessibilidade à população servida. Em complemento, no Capítulo 3 foram analisados os sistemas de transporte não convencionais, existindo alguns com a dualidade de serem guiados e não guiados,

partilhando assim a característica de serem flexíveis, tal como os sistemas rodoviários. Em suma, no **Quadro 5.11**, estão apresentadas as diversas alternativas, juntamente com a sua classificação segundo a flexibilidade, onde estão classificados com um 1 os sistemas de transporte flexíveis e com um 0 os sistemas de transporte rígidos.

Quadro 5.11 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua flexibilidade

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Dualidade guiado/não-guiado	Flexibilidade (0 ou 1)
a1	Autocarro tradicional em via banal	Sim	1
a2	Autocarro tradicional em via própria	Sim	1
a3	Troleibus em via própria	Sim	1
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Não	0
a5	SGMec	Sim	1
a6	SGCI – TVR	Sim	1
a7	SGCI – Translohr	Não	0
a8	SGO – Irisbus	Sim	1
a9	SGMagn - Phileas	Sim	1
a10	SGO - ART	Sim	1

5.4.5. Pontualidade (g5)

A pontualidade é um fator relevante na tomada de decisão do melhor sistema de transporte a utilizar, podendo ser influenciada por várias externalidades como as condições climáticas, a distância entre estações, a taxa de segregação das vias em relação ao restante tráfego, a prioridade do transporte público face aos restantes modos, entre outros (Tubis, et al., 2015). Neste contexto, considera-se que todas as externalidades são idênticas entre as alternativas, à exceção da taxa de segregação das vias. Desta forma, foram classificadas com um 1 as alternativas que possuem via própria e com um 0 as alternativas que não possuem via própria. Esta classificação está definida no **Quadro 5.12**.

Quadro 5.12 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua pontualidade

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Via própria	Pontualidade (0 ou 1)
a1	Autocarro tradicional em via banal	Não	0
a2	Autocarro tradicional em via própria	Sim	1
a3	Troleibus em via própria	Sim	1
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Sim	1
a5	SGMec	Sim	1
a6	SGCI – TVR	Sim	1
a7	SGCI – Translohr	Sim	1
a8	SGO – Irisbus	Sim	1
a9	SGMagn - Phileas	Sim	1
a10	SGO - ART	Sim	1

Comparando esta análise classificativa com a análise realizada por An (2011), o autor considera que existe uma variação na taxa de segregação da via em relação aos vários sistemas de transporte, dando por exemplo, uma nota superior ao TVR em relação ao Irisbus e ao autocarro em via própria. No entanto, ir-se-á considerar que todos os sistemas de transporte em via própria têm a possibilidade de ter a mesma taxa de segregação, de modo a equalizar a sua avaliação.

5.4.6. Segurança (g6)

No estudo de An (2011), a segurança não entra como critério a avaliar. No entanto, considerou-se que este critério é bastante importante na escolha do melhor sistema de transporte a implementar, em virtude de que a segurança influencia os custos de exploração dos sistemas e afeta diretamente a população envolvida. Definiu-se como objetivo deste critério a comparação dos vários sistemas de transporte em relação às anomalias nas suas infraestruturas. Assim sendo, não serão contabilizados os números de acidentes em cada transporte, mas sim os problemas derivados da infraestrutura, que influenciam a performance do sistema. Posto isto, foram classificados com um 5 os sistemas tradicionais rodoviários e ferroviários, uma vez que, atingem o nível máximo de fiabilidade e já existe um elevado conhecimento tecnológico para com as suas infraestruturas.

Num outro patamar, foi atribuída a classificação de 4 ao SGCI – Translohr, ao SGMagn – Phileas, ao SGO – Irisbus e ao ART por razões bastante distintas. O problema do sistema Translohr deve-se ao facto do carril intermédio ser uma zona negra para os ciclistas devido à grande saliência existente, provocando vários acidentes (Gino De Pauli, 2009). A falta de segurança do sistema Phileas está relacionada com a sua operacionalidade, tendo um veículo Phileas perdido o seu controlo em várias situações, onde foi necessário a atuação do condutor (Smiler (b), S.d.). No que diz respeito ao sistema Irisbus, existe a necessidade de realizar uma grande manutenção nas linhas-guia, sendo que, o grande inconveniente do sistema está na imprecisão do leitor ótico. Em relação ao ART, foi atribuída a mesma classificação que o sistema Irisbus por possuírem o mesmo sistema de guiamento.

Para o caso do SGMec foi atribuída uma classificação de 3. Este sistema tem uma infraestrutura própria cuja utilização não é possível por outros veículos, à exceção dos adaptados para o sistema, resultando num enorme número de acidentes, provocados por veículos que entram na infraestrutura. Este tipo de acidentes é muito recorrente no sistema em Cambridge devido aos vários cruzamentos existentes ao longo da via (Lynne, 2019).

Por último, atribuiu-se uma pontuação de 2 ao sistema TVR, que segundo um relatório de 2010, em relação ao sistema em Caen, o TVR teve cerca de 100 falhas num ano, fora os acidentes recorrentes com passageiros ou descarrilamentos (Loury, 2017), tendo a empresa encerrado operações na cidade.

No **Quadro 5.13**, encontram-se as alternativas classificadas em relação ao critério da segurança.

Quadro 5.13 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua segurança

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Segurança (1 a 5)
a1	Autocarro tradicional em via banal	5
a2	Autocarro tradicional em via própria	5
a3	Troleibus em via própria	5
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	5
a5	SGMec	3
a6	SGCI – TVR	2
a7	SGCI – Translohr	4
a8	SGO – Irisbus	4
a9	SGMagn - Phileas	4
a10	SGO - ART	4

5.4.7. Custo do material circulante (g7)

No **Quadro 5.14**, encontram-se expostos os custos unitários do material circulante.

Quadro 5.14 – Custo unitário do material circulante em relação a cada sistema

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Tipo de veículo	Custo unitário do material circulante em M€
a1	Autocarro tradicional em via banal	Autocarro articulado	0,499
a2	Autocarro tradicional em via própria	Autocarro biarticulado	0,832
a3	Troleibus em via própria	Troleibus articulado	1,109
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico/Metro Ligeiro 32m	2,330
a5	SGMec	Autocarro articulado	0,503
a6	SGCI – TVR	TVR	2,020
a7	SGCI – Translohr	Translohr STE4	2,430
a8	SGO – Irisbus	Autocarro articulado – Irisbus Citelis 18	0,520
a9	SGMagn - Phileas	Autocarro biarticulado - Phileas	1,530
a10	SGO - ART	ART – 3 carruagens	2,000

Fonte: Valores recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados;

O número de veículos depende da velocidade comercial, da extensão do percurso, do intervalo entre circulações, do tempo de batimento nos terminais e da taxa de reserva. Este parâmetro pode ser obtido através da equação [5.2].

$$Nv = \left(\frac{E}{Vc} + \frac{t_b}{60} \right) \times 2 \times \frac{60}{IC} \times \frac{(100 + t_r)}{100} \quad [5.2]$$

Onde: Nv : Número de veículos;

E : Extensão total da linha num sentido (km);

Vc : Velocidade comercial (km/h);

IC : Intervalo entre circulações (minutos/veículo);

t_b : Tempo de batimento no terminal (minutos). Igual a 10 minutos.

t_r : Taxa de reserva (%). Igual a 10%.

De modo a equalizar a presente análise, consideraram-se os valores médios de velocidade comercial definidos pelo IMTT (2011). Assim, atribuiu-se o mesmo valor de velocidade comercial média a todos os sistemas que circulam em via própria (todos os sistemas à exceção da alternativa a1). Em resumo, construiu-se o **Quadro 5.15** com todos os valores de velocidade, associados às diferentes alternativas.

Quadro 5.15 – Velocidade comercial aplicada a cada alternativa

Parâmetro	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Velocidade comercial (km/h)	15,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5

Fonte: IMTT (2011)

Com todos os dados recolhidos é possível obter o número de veículos de cada sistema de transporte para cada cenário, cujos valores estão expostos no **Quadro 5.16**. Salienta-se que os valores obtidos

referentes ao número de veículos foram arredondados à unidade acima do valor (ao contrário do estudo de An (2011)), uma vez que um veículo é uma unidade inteira.

Quadro 5.16 – Número de veículos mínimo em cada sistema, para a procura imposta

Alternativa (ai)	Cenário 1 (veículos)	Cenário 2 (veículos)	Cenário 3 (veículos)	Cenário 4 (veículos)
a1	25	50	75	100
a2	16	33	46	77
a3	20	39	58	77
a4	12	23	39	46
a5	20	39	58	77
a6	18	39	58	77
a7	14	29	46	58
a8	20	39	58	77
a9	18	39	58	77
a10	12	23	39	46

Por fim, é possível calcular o custo do material circulante dos vários sistemas de transporte, para cada cenário estabelecido. Estes valores encontram-se presentes no **Quadro 5.17**.

Quadro 5.17 – Custo do material circulante relativo dos vários sistemas de transporte, consoante o cenário estabelecido

Alternativa (ai)	Cenário 1 (M€/ano)	Cenário 2 (M€/ano)	Cenário 3 (M€/ano)	Cenário 4 (M€/ano)
a1	12,48	24,95	37,43	49,90
a2	13,31	27,46	38,27	64,06
a3	22,18	43,25	64,32	85,39
a4	27,96	53,59	90,87	107,18
a5	10,06	19,62	29,17	38,73
a6	36,36	78,78	117,16	155,54
a7	34,02	70,47	111,78	140,94
a8	10,40	20,28	30,16	40,04
a9	27,54	59,67	88,74	117,81
a10	24,00	46,00	78,00	92,00

5.4.8. Custo de construção (g8)

No **Quadro 5.18**, encontram-se presentes os custos de construção de cada sistema.

Quadro 5.18 – Custos de construção de cada sistema

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Custos de construção em M€/km
a1	Autocarro tradicional em via banal	1,62
a2	Autocarro tradicional em via própria	6,61
a3	Troleibus em via própria	10,18
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	17,66
a5	SGMec	7,26
a6	SGCI – TVR	18,33
a7	SGCI – Translohr	17,91
a8	SGO – Irisbus	8,35
a9	SGMagn - Phileas	4,66
a10	SGO - ART	10,01

Fonte: Valores recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados;

5.4.9. Custo de exploração anuais (g9)

Os custos de exploração anuais foram estimados através de uma análise económica baseada na análise realizada por An (2011). Devido à grande extensão da análise económica, é aconselhável confrontar a análise base, presente no estudo de An (2011), onde se encontram todas as etapas. No entanto, no **Anexo G**, estão disponibilizadas as etapas principais da análise económica bem como as alterações feitas em relação ao autor.

Resumidamente, no **Quadro 5.19**, encontram-se presentes os custos de exploração anuais de cada sistema de transporte, em milhões de euros, consoante a procura imposta.

Quadro 5.19 – Custos de exploração anuais dos vários sistemas de transporte, consoante o cenário criado

Alternativa (ai)	Cenário 1 (M€/ano)	Cenário 2 (M€/ano)	Cenário 3 (M€/ano)	Cenário 4 (M€/ano)
a1	7,56	12,42	17,38	22,20
a2	6,50	10,93	14,31	22,04
a3	7,35	11,30	15,20	19,22
a4	6,86	9,48	13,07	14,85
a5	6,96	11,17	15,32	19,60
a6	7,78	12,80	17,27	21,90
a7	7,34	10,75	14,93	17,58
a8	6,97	11,15	15,27	19,53
a9	6,00	9,99	13,53	17,20
a10	5,69	8,22	11,69	13,40

5.4.10. Atratividade (g10)

Considera-se como atratividade nos transportes públicos, o nível de preferência que um utilizador tem em relação aos vários sistemas de transporte, para um mesmo percurso. Este critério é bastante subjetivo, dependendo da amostra populacional em questão. Para a sua avaliação teve-se em conta o estudo de Scherer, et al. (2012), onde foram analisadas as preferências de uma amostra de população em cidades alemãs e suíças, face ao transporte por autocarro e elétrico. Deste modo, no que diz respeito à atratividade dos dois meios de transporte, a população dá uma grande preferência ao elétrico, sendo que uma das razões atribuídas é o facto de este ser guiado.

Com base no estudo indicado, classificaram-se os diferentes sistemas de transporte, de 1 a 5. Em consequência de não existir uma escala de valores para todos os sistemas, teve-se como padrão o sistema de autocarros tradicional com a pior classificação, de valor igual a 1, e o elétrico com melhor classificação, de valor igual a 5. Seguidamente, classificou-se o sistema Translohr com um 5, por ser guiado via carril em todo o seu percurso, à semelhança do elétrico tradicional. Classificaram-se os sistemas TVR e ART com um 4, por poderem ser guiados e pelo facto de os seus veículos terem um formato de elétrico com uma elevada capacidade. Todos os restantes sistemas com um outro tipo de guiamento, atribuiu-se uma classificação igual a 3. As alternativas que não são guiadas, mas que circulam em via própria, atribuiu-se uma classificação igual a 2. No **Quadro 5.20**, encontram-se dispostas as diferentes alternativas, classificadas segundo a sua atratividade.

Quadro 5.20 – Classificação dos sistemas de transporte em relação à sua atratividade

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Tipo de veículo	Atratividade (1 a 5)
a1	Autocarro tradicional em via banal	Autocarro articulado	1
a2	Autocarro tradicional em via própria	Autocarro biarticulado	2
a3	Troleibus em via própria	Troleibus articulado	2
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico/Metro Ligeiro 32m	5
a5	SGMec	Autocarro articulado	3
a6	SGCI – TVR	TVR	4
a7	SGCI – Translohr	Translohr STE4	5
a8	SGO – Irisbus	Autocarro articulado – Irisbus Citelis 18	3
a9	SGMagn - Phileas	Autocarro biarticulado - Phileas	3
a10	SGO - ART	ART – 3 carruagens	4

5.4.11. Emissões de gases (g11)

No **Quadro 5.21** estão apresentadas as emissões unitárias de CO₂ e de gases nocivos (NO_x e PM₁₀) emitidos por quilómetro percorrido.

Quadro 5.21 – Emissões unitárias CO₂ de cada sistema de transporte

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Energia	Emissões CO ₂ em g/km_perc ^[1]	Emissões NO _x em g/km_perc ^[1]	Emissões PM ₁₀ em g/km_perc ^[1]
a1	Autocarro tradicional em via banal	Diesel	879	6,67	0,07
a2	Autocarro tradicional em via própria	Diesel	879	6,67	0,07
a3	Troleibus em via própria	Elétrico	0	0	0
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico	0	0	0
a5	SGMec	Diesel	879	6,67	0,07
a6	SGCI – TVR	Elétrico	0	0	0
a7	SGCI – Translohr	Elétrico	0	0	0
a8	SGO – Irisbus	Diesel	879	6,67	0,07
a9	SGMagn - Phileas	GLP	615	0,93	0,07
a10	SGO - ART	Elétrico	0	0	0

Fonte: [1] – (NZ Transport Agency, 2017);

De modo, a identificar o número total de emissões de gases por sistema de transporte, calculou-se a distância percorrida por cada alternativa, consoante a procura imposta. Estas distâncias (km_perc), encontram-se presentes no **Anexo H**, juntamente com os cálculos necessários para a sua obtenção. Por conseguinte, é possível obter o valor total das emissões de gases, que estão apresentados no **Quadro 5.22**. É de realçar que os valores apresentados no quadro são referentes ao cenário 1, mas como estes valores são proporcionais em relação à procura, a classificação das alternativas é igual em todos os cenários, não existindo a necessidade de apresentar os valores para os 4 cenários.

Quadro 5.22 – Classificação das alternativas em relação às emissões de gases. Valores exemplificativos para o cenário 1

Alternativa (ai)	Energia	Emissões CO ₂		Emissões NO _x		Emissões PM ₁₀		Classificação 1 a 5
		kg	Proporção (%)	kg	Proporção (%)	kg	Proporção (%)	
a1	Diesel	1073259	100	8144	100	85	100	2
a2	Diesel	858607	80	6515	80	68	80	3
a3	Elétrico	0	0	0	0	0	0	5
a4	Elétrico	0	0	0	0	0	0	5
a5	Diesel	1073259	100	8144	100	85	100	2
a6	Elétrico	0	0	0	0	0	0	5
a7	Elétrico	0	0	0	0	0	0	5
a8	Diesel	1073259	100	8144	100	85	100	2
a9	GLP	693152	65	1048	13	79	92	4
a10	Elétrico	0	0	0	0	0	0	5

Os valores obtidos são muito diferentes dos valores identificados por An (2011), visto que o autor utilizou outros valores padrão.

5.4.12. Inserção no espaço público (g12)

A facilidade de inserção espacial de um transporte público no espaço urbano é uma peça fulcral para a sua implementação, sendo que são destacadas duas características importantes a ter em conta: a largura da via e o raio de giração. Ambas estas características estão resumidas no **Quadro 5.23**.

Quadro 5.23 – Classificação dos tipos de sistema em relação à sua inserção no espaço urbano

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Largura de duas vias (m)	Classificação da largura (1 a 5)	Raio de giração mínimo (m)	Classificação do raio de giração (1 a 5)	Inserção no espaço público ^[A] (1 a 5)
a1	Autocarro tradicional em via banal	6,50	3	11	5	4
a2	Autocarro tradicional em via própria	6,50	3	11	5	4
a3	Troleibus em via própria	6,50	3	11	5	4
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	6,00	4	25	1	2,5
a5	SGMec	6,20	4	12	4	4
a6	SGCI – TVR	5,40	5	10,5	5	5
a7	SGCI – Translohr	6,80	3	12	4	3,5
a8	SGO – Irisbus	6,80	3	12	4	3,5
a9	SGMagn - Phileas	6,60	3	12	4	3,5
a10	SGO - ART	7,66	2	15	3	2,5

Fonte: Confrontar **Quadro F.1**, presente no **Anexo F**; **Obs.:** [A] – Valores calculados através da média de 50% da classificação da largura + 50% da classificação do raio de giração;

O raio de giração indica o espaço necessário para que um veículo possa proceder à sua manobra de viragem, numa curva. Este critério é de máxima importância em zonas urbanas, uma vez que, o espaço

disponível é mais escasso e pode-se tornar difícil de efetuar as manobras de viragem (Costa, 2018). An (2011) não considerou o raio de giração, apresentando uma classificação distinta.

No **Quadro 5.23**, estão classificadas as diferentes alternativas em relação à sua inserção no espaço público. De modo a promover a aglomeração de critérios, foi necessário efetuar uma classificação preliminar em relação à largura da via e ao raio de giração. No final, efetuou-se a média dos valores, de modo a atingir um valor único de inserção no espaço público.

5.4.13. Ruído (g13)

No **Quadro 5.24**, encontram-se presentes as diferentes alternativas, juntamente com as suas emissões sonoras, de acordo com a fonte de energia de cada veículo.

Quadro 5.24 – Valor do ruído emitido pelos diferentes tipos de sistemas

Alternativa (ai)	Sistema de transporte	Fonte de energia	Ruído (dB) [1]
a1	Autocarro tradicional em via banal	Diesel	68
a2	Autocarro tradicional em via própria	Diesel	68
a3	Troleibus em via própria	Elétrico	60
a4	Elétrico/Metro Ligeiro	Elétrico	60
a5	SGMec	Diesel	68
a6	SGCI – TVR	Elétrico	60
a7	SGCI – Translohr	Elétrico	60
a8	SGO – Irisbus	Diesel	68
a9	SGMagn - Phileas	Híbrido	64
a10	SGO - ART	Elétrico	60

Fonte: [1] – (NZ Transport Agency, 2017);

5.5. Calibração dos limiares e pesos para o método ELECTRE

5.5.1. Pesos atribuídos aos critérios para o método ELECTRE III

Tal como An (2011), foi realizada uma análise de sensibilidade ao método de AMC, com o objetivo de ver a variação de *ranking* dos sistemas de transporte, dentro de cada cenário. Esta análise de sensibilidade foi realizada através da imposição de pesos nos diferentes critérios a avaliar.

A ponderação de pesos teve como base a análise efetuada por An (2011), onde são divididos os diferentes critérios nas seguintes categorias: desempenho do sistema, custos associados, e aspetos ambientais e urbanísticos. Como referência, o autor deu mais relevância ao desempenho do sistema, seguido dos custos associados, e por fim, os aspetos ambientais e urbanísticos. Posteriormente, foram criados 3 grupos de pesos (W_j), onde o primeiro tem o objetivo de dar mais destaque aos critérios do desempenho do sistema na análise, o segundo tem como intuito enfocar os critérios relativos aos custos associados e, por último, o terceiro grupo salienta os aspetos ambientais e urbanísticos. Todos os valores considerados encontram-se expostos no **Quadro 5.25**. Realça-se que, as ponderações são distintas relativamente às de An (2011), visto que existem critérios para análise distintos. No entanto, manteve-se sempre o valor do subtotal igual entre os dois estudos.

Quadro 5.25 – Pesos estipulados para a análise de sensibilidade

Categoria	Critérios a avaliar (gj)	Peso de referência W_{REF}	Grupo I (W_I)	Grupo II (W_{II})	Grupo III (W_{III})
Desempenho do sistema	Acessibilidade (g1)	25	30	20	15
	Intervalo entre circulações (g2)	30	40	25	25
	Fiabilidade (g3)	30	40	25	25
	Flexibilidade (g4)	20	20	15	15
	Pontualidade (g5)	20	20	15	10
	Segurança (g6)	25	30	20	20
	Subtotal	150	180	120	110
Custos associados	Custo do material circulante (g7)	25	20	35	20
	Custo de investimento (g8)	25	20	35	20
	Custo de exploração (g9)	50	40	70	40
	Subtotal	100	80	140	80
Aspetos ambientais e urbanísticos	Atratividade (g10)	5	10	10	20
	Emissões de gases (g11)	15	10	10	30
	Inserção no espaço urbano (g12)	15	10	10	30
	Ruído (g13)	15	10	10	30
	Subtotal	50	40	40	110
TOTAL		300	300	300	300

5.5.2. Limiares estipulados para os critérios

Os limiares considerados para os critérios em avaliação encontram-se definidos no **Quadro 5.26**.

Quadro 5.26 – Limiares definidos para a análise

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13
Unidades	0 ou 1	0 ou 1	1 a 9	0 ou 1	0 ou 1	1 a 5	M€	M€/km	M€/ano	1 a 5	1 a 5	1 a 5	dB
Q	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	10%	10%	10%	1,00	1,00	1,00	10%
P	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	20%	20%	30%	2,00	2,00	2,00	20%
V	2,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	100%	100%	50%	5,00	5,00	5,00	50%

A adoção destes critérios teve como base o estudo de An (2011). Em contrapartida, o autor não explicita a que valor correspondem as percentagens mencionadas. Assim sendo, neste caso, foi considerado que as percentagens definidas nos limiares serão sempre aplicadas aos valores mais altos. Por outro lado, foi definido um limiar de veto bastante rigoroso no critério referente ao intervalo entre circulações, para que um sistema de transporte que não respeite os limiares de intervalo entre circulações, tenha uma penalização e diminua a sua credibilidade em relação às outras alternativas.

5.6. Aplicação do método ELECTRE III e IV

A análise que se segue é bastante complexa, uma vez que, para cada caso é necessário proceder a uma longa metodologia associada ao método ELECTRE. Como o principal objetivo deste estudo é o de comparar vários sistemas de transporte que se deslocam à superfície, procedeu-se à utilização de um *software* desenvolvido por Pereira, et al. (2019), denominado por J-ELECTRE. Este programa, em linguagem Java, está programado para aplicar automaticamente o método ELECTRE.

Salienta-se que, este programa toma como preferência o sentido de classificação ascendente para cada critério. Assim sendo, tornaram-se como negativos todos os dados referentes aos critérios cujo sentido de classificação seja descendente. Os critérios afetados por esta mudança são os critérios referentes aos custos associados (g7, g9 e g9) e ao ruído (g13). Com esta alteração, todos os critérios avaliados tomam o mesmo sentido de classificação ascendente, cujo valor mais elevado diz respeito à melhor classificação. Sem esta alteração, estar-se-ia a afirmar que, por exemplo, uma alternativa com maior custo era a melhor.

Nos **Anexos I, J, K e L**, estão disponíveis 4 quadros que resumem as avaliações dos vários critérios em relação às várias alternativas, para cada cenário e para cada grupo de pesos associado. Nestes quadros, consta também o sistema ART (a10) (a vermelho), porém este sistema apenas será analisado no Capítulo 6.

Recorda-se que, na ordenação de alternativas é possível obter três soluções diferentes na ordenação: alternativas que sobreclassificam ou são sobreclassificadas por outras, existindo apenas uma alternativa numa posição na ordenação; alternativas indiferentes a outras, que partilham a mesma posição na ordenação; alternativas incomparáveis. Em relação às alternativas incomparáveis, serão apresentados os vários trajetos de ordenação.

5.6.1. Cenário 1 - 1000 passageiros/hora/direção

No **Quadro 5.27**, estão expostas as classificações das várias alternativas, através da utilização do método ELECTRE III e IV, em relação ao cenário 1.

Quadro 5.27 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 1

ELECTRE III										ELECTRE IV			
Posição na classificação	W _{REF}		W _I		W _{II}		W _{III}		-				
1º	a5; a8		a8		a5		a3		a4				
2º	a3		a3; a5		a8		a5		a5		a1		
3º	a1		a1		a3		a1; a8		a9		a2		
4º	a9		a4; a9		a9 a1		a9		a7		a3		
5º	a4 a2		a7 a2		a2; a4		a4; a7		a8		a7 a6		
6º	a7		a6		a7		a6				a8		
7º	a6				a6		a2						

Analisando o quadro em questão é possível verificar que os resultados obtidos pelo método ELECTRE III, segundo os diferentes grupos de pesos, têm algumas semelhanças. Estes resultados indicam que o sistema de troleibus (a3), o sistema Irisbus (a8) e o SGMec (a5) são os sistemas com melhor

pontuação. O primeiro, destaca-se no grupo de pesos com maior incidência nos aspetos urbanísticos e ambientais (W_{III}). Em relação ao SGMec, este destaca-se no grupo dos custos associados (W_{II}) e no grupo de referência (W_{REF}), juntamente com o sistema Irisbus, cujo símbolo “;” indica indiferença entre alternativas. O sistema Irisbus é isoladamente destacado no grupo dos pesos relacionado com o desempenho do sistema (W_I). Por outro lado, o sistema TVR (a6) é o sistema que tem pior classificação, em todos os grupos, à exceção do W_{III} , cujo pior sistema pertence ao autocarro biarticulado em via segregada.

Procedendo à análise do método ELECTRE IV, verifica-se que a sua classificação é bastante distinta em relação à do método ELECTRE III. Neste caso, o pior classificado é o sistema Irisbus (a8), e o melhor classificado é o sistema de elétrico em via segregada (a4).

Numa outra perspetiva, é no método ELECTRE IV onde existem mais alternativas incomparáveis, cujo símbolo “|” indica incomparabilidade entre alternativas, criando vários trajetos possíveis de ordenação, sendo que, um destes é o que começa na alternativa a4 (1º lugar), seguida da a5, a9, a7 e a8, onde a alternativa a5 é incomparável com a alternativa a1, tal como a a9 com a a2 e a a7 com a a3. Por outro lado, é possível observar que a alternativa a8 está sempre em último lugar, porém está em lugares de classificação diferentes em dois trajetos.

5.6.2. Cenário 2 - 2000 passageiros/hora/direção

No **Quadro 5.28**, estão apresentadas as classificações das várias alternativas, através da utilização do método ELECTRE III e IV, para o caso do cenário 2.

Quadro 5.28 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 2

Posição na classificação	ELECTRE III				ELECTRE IV					
	W_{REF}	W_I	W_{II}		W_{III}	-				
1º	a8	a3; a8	a8		a3	a4				
2º	a2; a3; a4; a5; a9	a2; a4; a5; a7; a9	a2		a2; a4; a5; a8; a9	a9	a5		a2	a1
3º	a7	a1	a5		a7	a7	a3	a7	a6	a3
4º	a1	a6	a9	a3	a6	a8	a6	a8	a8	a6
5º	a6		a4		a1		a8			a8
6º			a7	a1						
7º			a6							

Através de uma análise das classificações obtidas é possível observar que, o sistema Irisbus (a8) e o sistema de troleibus (a3) foram os que obtiveram uma melhor pontuação, em relação ao método ELECTRE III. À semelhança dos resultados obtidos no cenário 1, o sistema TVR (a6) foi o sistema que obteve a pior classificação, segundo o ELECTRE III, a sua exceção está, uma vez mais, no grupo de pesos W_{III} , onde o autocarro articulado em via banal (a1) obteve a pior classificação.

À semelhança das classificações obtidas segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 1, o sistema com melhor pontuação continua a ser o elétrico (a4) e o sistema Irisbus (a8) continua a ser o sistema

que tem a pior classificação. Sendo que, é neste método onde existe um maior número de alternativas incomparáveis.

5.6.3. Cenário 3 - 3000 passageiros/hora/direção

Na **Quadro 5.29**, constam as classificações das várias alternativas, através da utilização do método ELECTRE III e IV, para o caso do cenário 3.

Quadro 5.29 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 3

ELECTRE III					ELECTRE IV				
Posição na classificação	W_{REF}	W_I	W_{II}	W_{III}	-				
1º	a8	a3; a8	a8	a3	a4				
2º	a2; a3; a4; a5; a9	a2; a4; a5; a7; a9	a2	a2; a5; a8; a9	a9	a5		a2	a1
3º	a7	a1	a5	a3	a4; a7	a7	a3	a7	a6
4º	a1	a6	a9		a6	a8	a6	a8	a8
5º	a6		a4	a1		a8			a8
6º			a7	a1					
7º			a6						

Observando os resultados obtidos, é possível destacar que existiram poucas oscilações das classificações, em relação ao cenário 2. Desta forma, os sistemas a3 e a8 continuam a ser os melhores classificados, segundo o ELECTRE III. Por outro lado, tal como acontece no cenário 2, o TVR (a6) é a alternativa com pior classificação em todos os grupos de pesos, à exceção do grupo de pesos W_{III} .

Em relação às classificações obtidas segundo o ELECTRE IV, não existiram grandes alterações em relação ao cenário 2.

5.6.4. Cenário 4 - 4000 passageiros/hora/direção

No **Quadro 5.30**, estão apresentadas as classificações das várias alternativas, através da utilização do método ELECTRE III e IV, para o caso do cenário 4.

Quadro 5.30 – Soluções da AMC através do ELECTRE III e IV, para o cenário 4

ELECTRE III					ELECTRE IV				
Posição na classificação	W_{REF}	W_I	W_{II}	W_{III}	-				
1º	a4	a4	a4; a7	a4; a7	a4				
2º	a7	a7	a2; a3; a5; a8; a9	a1	a3	a3		a5	
3º	a3; a5; a8	a3; a5; a8	a6	a1	a9	a1		a9	
4º	a9	a1; a2	a2	a2; a5; a8		a6	a2	a6	a7
5º	a6	a1		a6		a8			
6º		a6							

As soluções obtidas para o cenário 4 são bastante distintas dos restantes cenários. Para esta hipótese, o elétrico (a4) é o sistema de transporte mais viável de implementar para todos os grupos de pesos do método ELECTRE III e também para o método ELECTRE IV. Esta alternativa partilha o lugar de pódio

com o Translohr (a7) para o caso dos grupos de pesos W_{II} e W_{III} . Esta alteração dos lugares de pódio deve-se, maioritariamente, ao facto de que apenas o sistema elétrico e o sistema Translohr cumprem os limites de intervalo entre circulações estabelecidos anteriormente. Todos os restantes sistemas foram vetados, tendo como consequência uma grande diminuição da sua credibilidade, como se pode comprovar através da análise dos **Quadros 5.31 (a) e (b)**, sendo que estes quadros correspondem à matriz de credibilidade do cenário 3 e 4, respetivamente, para o grupo de pesos W_I .

Quadro 5.31 – Matriz de credibilidade das alternativas a4 e a7, para o W_I , em relação ao (a) cenário 3, (b) cenário 4

(a)			(b)		
	a4	a7		a4	a7
a1	0,00	0,00	a1	0,00	0,00
a2	0,83	0,83	a2	0,00	0,00
a3	0,85	0,87	a3	0,00	0,00
a4	-	1,00	a4	-	1,00
a5	0,81	0,93	a5	0,00	0,00
a6	0,51	0,74	a6	0,00	0,00
a7	0,94	-	a7	0,92	-
a8	0,91	0,93	a8	0,00	0,00
a9	0,83	0,83	a9	0,00	0,00

Numa outra vertente, o TVR (a6) é o sistema com pior pontuação, segundo a abordagem do método ELECTRE III. Por outro lado, o sistema Irisbus (a8) é o último classificado, segundo o ELECTRE IV.

5.6.5. Análise global dos resultados

Analisando os resultados obtidos segundo o método ELECTRE III retira-se que, o Irisbus (a8) é o sistema com melhor classificação em relação aos cenários 1, 2 e 3, para todos os grupos de pesos, à exceção do grupo de pesos W_{III} . Esta exceção deve-se ao facto de que o grupo de pesos W_{III} dá maior destaque aos critérios urbanísticos e ambientais, fazendo com que o sistema troleibus (a3) tenha um melhor desempenho em relação ao sistema Irisbus, uma vez que, o troleibus utiliza a eletricidade como tipo de energia e os veículos analisados segundo o Irisbus utilizam o diesel como fonte de energia.

O sistema TVR (a6) é, globalmente, o sistema de transporte com pior classificação por ter um fraco desempenho a nível da segurança e da fiabilidade e, adicionalmente, por possuir um elevado custo associado à construção da infraestrutura, ao material circulante e ao custo de exploração do sistema. Esta alternativa somente não é considerada como a pior classificada, no grupo W_{III} , em relação aos cenários 1, 2 e 3. Nestes casos, como o sistema TVR cumpre o intervalo entre veículos mínimo e como possui veículos híbridos, onde utiliza, maioritariamente, a energia elétrica para sua locomoção, tem globalmente um desempenho melhor que os sistemas com veículos a diesel correspondentes ao autocarro articulado em via comum (a1) e ao autocarro biarticulado em via própria (a2).

Por outro lado, o sistema de elétrico (a4) e o sistema Translohr (a7) não são os preferíveis em relação aos cenários 1, 2 e 3 por possuírem custos de material circulante e de construção bastante elevados para a procura imposta em questão. Além disso, esta premissa é destacada no grupo W_{II} , que dá realce aos custos associados, uma vez que, se pode observar que ambas as alternativas têm uma pior classificação neste grupo em comparação com as suas classificações para com os restantes grupos

de pesos. Assim, estes sistemas de transporte apenas são os mais indicados para procura horárias iguais ou superiores a 4000 passageiros por direção.

Em relação aos resultados obtidos segundo o método ELECTRE IV, em todos os cenários o elétrico (a4) é o sistema com melhor classificação e o Irisbus (a8) é o sistema que com pior classificação. Através destes resultados obtidos, comprova-se a teoria de que o ELECTRE IV tem uma abordagem bastante diferente do ELECTRE III, dando resultados complementemente discrepantes. Assim, procedeu-se ao cálculo das matrizes de credibilidade do método ELECTRE IV (**Anexo M**) e do método ELECTRE III (**Anexo N**). Destaca-se que, nas matrizes presentes nos **Anexos M e N** existem células em branco, cujo valor significativo indica que a credibilidade de que uma alternativa sobre classifique outra é nula, ou seja, igual a 0. Esta diferença representativa tem como objetivo dar realce à diferença dos valores de credibilidade entre os métodos ELECTRE III e ELECTRE IV.

Analisando as matrizes de credibilidade do método ELECTRE IV, é possível identificar que, globalmente, existe uma fraca credibilidade de que uma alternativa sobre classifique outra. Por exemplo, em relação ao cenário 1, o sistema de elétrico (a4), que foi considerado o melhor sistema segundo o método em questão, apenas é credível que tenha uma classificação superior ao Translohr (a7). Em oposição, o sistema Irisbus (a8), que tem a pior classificação segundo o ELECTRE IV, gera uma credibilidade de 60%, de ter uma classificação superior às alternativas a2 e a5. Posto isto, pode-se concluir que o método ELECTRE IV não tem um bom desempenho na análise em questão.

Em relação à matriz de credibilidade do ELECTRE III, consegue-se observar uma grande coerência entre os valores de credibilidade obtidos e a classificação de alternativas gerada. O sistema Irisbus (a8), que no cenário 1 é o eleito, apresenta uma credibilidade próxima da máxima de sobre classificar qualquer outra alternativa. Em contraste, o sistema TVR (a6) é a alternativa com valores de credibilidade mais baixos em relação aos restantes sistemas de transporte, correspondendo numa fraca credibilidade de poder sobre classificar qualquer outra alternativa. Em concordância, o TVR é o sistema com pior classificação no cenário em questão, segundo o grupo de pesos W_i . Esta coerência de valores faz com que o método ELECTRE III tenha um desempenho muito mais positivo que o ELECTRE IV.

Em comparação com os resultados obtidos por An (2011), o autor também identificou que o método ELECTRE IV não é um bom método avaliador para a sua análise. Neste caso, o autor apenas utilizou este método num cenário de referência.

Em relação às soluções obtidas segundo o método ELECTRE III, como o autor criou cenários com características bastante diferentes da presente análise, é necessário interpretar os seus resultados segundo os cenários criados, que se encontram presentes na Secção 5.3.3. Deste modo, no **Quadro 5.32** estão apresentadas as classificações obtidas pelo autor, através do método ELECTRE III.

Quadro 5.32 – Quadro resumo das classificações dos sistemas de transporte avaliados no estudo realizado por An (2011)

Cenário	Grupos de pesos	Elétrico	Translohr	TVR	Civis/Irisbus	Troleibus	Autocarro articulado em via própria
Cenário 1	W_{REF}	1	2	3	4	4	4
	W_I	1	2	2	3	3	4
	W_{II}	2	3	1	1	4	1
	W_{III}	1	2	2	3	3	4
Cenário 2	W_{REF}	1	2	2	3	4	5
	W_I	1	2	2	4	4	3
	W_{II}	1	2	2	1	3	1
	W_{III}	1	2	2	5	4	3
Cenário 3	W_{REF}	1	2	2	3	3	4
	W_I	1	2	2	3	3	4
	W_{II}	1	3	2	1	4	1
	W_{III}	1	1	1	4	2	3
Cenário 4	W_{REF}	2	2	5	3	1	4
	W_I	1	1	2	2	2	3
	W_{II}	2	2	4	1	3	2
	W_{III}	2	2	3	3	1	3

Analisando o quadro em questão, retira-se que o elétrico é o transporte de eleição para os cenários 1, 2 e 3, onde ou coexiste uma maior velocidade comercial ou uma maior capacidade anual de passageiros. Por outro lado, no cenário 4, os sistemas de autocarros Irisbus e troleibus são os sistemas dominantes, uma vez que, este cenário contempla menores velocidades, agregadas a uma menor capacidade. Sendo que, a sua única exceção é o grupo de pesos relacionado com o desempenho do sistema, que dá preferência ao elétrico e ao Translohr.

Apesar dos cenários serem distintos, o conceito por detrás das análises é idêntico, que demonstra que o elétrico é o preferido para grandes procuras e os sistemas Irisbus e troleibus são os preferidos para procuras mais reduzidas. No entanto, na presente análise foi possível retirar com clareza que o sistema Irisbus é, globalmente, o mais viável de implementar para uma procura horária igual ou inferior a 3000 passageiros por direção, e o sistema de elétrico é o sistema com maior viabilidade de implementação segundo uma procura horária igual ou superior a 4000 passageiros por direção.

5.7. Conclusões do capítulo

Concluindo o Capítulo 5 é exequível afirmar que a avaliação de sistemas de transporte, segundo uma AMC é algo muito complexo e que implica um grande rigor, visto que uma pequena alteração nos dados a avaliar em cada critério pode influenciar a classificação das alternativas. Contudo, a AMC é um instrumento de análise bastante flexível, uma vez que, o analista pode decidir que alternativas analisar e que critérios avaliar. Sendo que, numa avaliação de sistemas de transporte, o tipo de veículo em questão tem uma grande influência na classificação dos sistemas.

Os critérios relacionados com os custos associados são os critérios menos rigorosos. Os custos de construção da infraestrutura foram obtidos através de uma média dos custos de construção recolhidos em relação aos sistemas já implementados, com valores bastante discrepantes entre si. Assim, seria pertinente efetuar uma análise económica para os custos de construção. Em relação aos custos de

exploração, foi elaborada uma análise económica, baseada na análise de An (2011). Esta análise necessitaria de uma validação, uma vez que, foram realizadas algumas alterações em relação à análise do autor. Além disso, a análise do autor poderá não ter tido qualquer tipo de validação.

No que diz respeito ao método ELECTRE III, este é um método de AMC bastante complexo, que aborda questões como a concordância, a discordância e a credibilidade entre critérios, sendo também um método bastante flexível e subjetivo, existindo vários pressupostos que têm de ser impostos pelo analista, tais como: os pesos de cada critério e os limiares. Os resultados obtidos segundo este método foram bastante positivos, existindo uma forte ligação entre a matriz de credibilidade das alternativas e as classificações obtidas. Como consequência, existiram poucas alternativas incomparáveis.

Em contraste, o método ELECTRE IV demonstrou um mau desempenho na avaliação das alternativas para o presente estudo. O ELECTRE IV é um método mais rígido que o ELECTRE III porque não considera diferentes pesos entre critérios, tendo como consequência a inexistência do conceito de concordância e discordância entre alternativas. Esta diferença na metodologia faz com que para uma matriz com um elevado número de alternativas e de critérios, bastante diferentes entre si, reduza a credibilidade entre alternativas e torne difícil efetuar a sua avaliação.

Salienta-se que, a metodologia abordada pelo ELECTRE IV para a obtenção da matriz de credibilidade é muito estrita, dando-se o exemplo de que uma alternativa a tem uma total credibilidade de ter uma classificação superior a uma alternativa b , se e só se não existir nenhum critério para o qual o desempenho de b é superior ao desempenho de a mais o limiar de indiferença. Assim que, para uma matriz com 13 critérios em avaliação, bastante distintos, esta hipótese torna-se bastante difícil de garantir. E, adicionalmente, os valores de credibilidade, segundo este método, são discretos e não lineares como acontece no ELECTRE III, sendo imposta uma maior diferenciação entre alternativas. Em consequência destes inconvenientes para a presente análise, a matriz de credibilidade apresenta valores bastante baixos. Além disso, os valores de credibilidade presentes não são coerentes com as classificações obtidas. Uma outra medida de análise ao desempenho deste método hierárquico é a quantidade de alternativas incomparáveis que foram obtidas, não sendo viável afirmar que uma alternativa sobre classifica outra com o grau de incomparabilidade presente nos 4 cenários elaborados. Desta forma, realça-se que os resultados obtidos segundo o método ELECTRE IV não têm qualquer valor significativo para a presente análise.

Por último, apenas foi possível validar as soluções obtidas na presente análise com o estudo de literatura de An (2011), tornando-se numa limitação. Seria importante, num desenvolvimento futuro, aplicar o caso teórico desenvolvido no presente estudo a um caso prático, procedendo à validação dos pesos e limiares estipulados bem como de todos os critérios assumidos. Não obstante, o facto de se ter realizado um caso de estudo teórico teve como benefício a liberdade de análise, não tendo existido entraves à análise dos vários sistemas de transporte.

6. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELECTRE III PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DO *AUTONOMOUS RAIL RAPID TRANSIT* (ART)

Conforme se comentou no Capítulo 3, o sistema ART é uma das futuras inovações no SGO, conjugando as vantagens de um sistema guiado com a atratividade de um modelo de veículo similar a um elétrico. Além disso, este sistema prevê ter melhores desempenhos ao nível da automação do veículo e ao nível dos aspetos urbanísticos e ambientais. Assim, torna-se aliciante investigar a viabilidade de implementar um sistema de transporte com esta tecnologia e comparar com as alternativas seleccionadas na análise do Capítulo 5.

Dividiu-se o presente Capítulo 6 em 3 subcapítulos. No subcapítulo 6.1., será explicada a metodologia de análise ao sistema ART. De seguida, no subcapítulo 6.2., será executado o método ELECTRE III, com todos os parâmetros estipulados no capítulo anterior, e será também realizada uma análise às soluções obtidas. Por fim, será feita uma conclusão do capítulo.

6.1. Metodologia

Esta análise tem como objetivo estimar a viabilidade do sistema ART, identificando a partir de que momento é que o sistema ART é preferível face às outras 9 alternativas já analisadas no Capítulo 5. Para proceder a esta análise, utilizou-se o método ELECTRE III, usado no Capítulo 5. O método ELECTRE IV não foi utilizado, uma vez que, teve um mau desempenho na análise presente no Capítulo 5, cujos valores obtidos não tiveram qualquer significado relevante para a análise pretendida.

Em primeiro lugar, recolheu-se e compilou-se toda a informação relativa a este sistema de transporte, de modo a categorizá-lo e pontuá-lo consoante os critérios estipulados no Capítulo 5. Dentro destes critérios, os que estão relacionados com os custos são os critérios com menos rigor, visto que, ainda não existem dados oficiais sobre os custos de construção, material circulante ou de exploração. Apenas existem estimativas para os dois primeiros custos enumerados, não existindo qualquer estimativa para o custo de exploração do sistema ART. Desta forma, escolheu-se tornar como variável dependente o custo de exploração anual, não só por não existir nenhuma estimativa referenciada, como também pelo facto de ser um custo facilmente manipulável ao longo dos anos. Assim sendo, serão realizadas várias iterações, mudando constantemente o valor do custo de exploração, até se descobrir o valor limite que faz com que o sistema ART fique na 1ª posição classificativa, em relação às outras alternativas, mantendo sempre os restantes critérios com valores constantes, definidos no capítulo anterior e resumidos em anexo. Estas iterações serão realizadas tendo em conta os 4 cenários, definidos no Capítulo 5, e em relação aos 4 grupos de pesos, definidos também no mesmo Capítulo 5. Com isto, procurar-se-á ver a diferença de desempenho do sistema ART para com os cenários e grupos de pesos estipulados.

Metodologicamente, apenas se dará como finalizada a iteração quando se descobrir que o valor de transição entre uma posição do sistema ART e a 1ª posição, está contido dentro de um intervalo máximo

de 50 000€, de modo a aumentar o rigor da iteração. Dá-se como exemplo o seguinte: se o valor real de transição de 2º para 1º lugar do ART for de 2,72M€, apenas se finalizará a iteração quando se souber que com 2,75M€, o sistema ART está em 2ºlugar, e com 2,70M€, este passa para 1ºlugar. Assim, retira-se que o valor máximo para o qual o sistema ART é o mais viável, é igual a 2,70M€. Apenas será considerado o valor para o qual o sistema ART é preferível em relação às restantes alternativas, e não indiferente.

Após a obtenção dos custos de exploração anuais máximos, que preferenciam o sistema ART, será possível verificar a sua viabilidade, comparando os respetivos valores com os valores obtidos de custo de exploração das restantes 9 alternativas, calculados através da análise económica elaborada no Capítulo 5, e referente a cada cenário (**Quadro 5.19**).

Por último, será realizada uma análise económica em relação aos custos de exploração do sistema ART, com base nos custos do sistema de elétrico e Irisbus, sendo esta uma estimativa aproximada ao possível valor real. Estes valores serão depois comparados com os valores transitórios obtidos pelo método ELECTRE III.

6.2. Aplicação do método ELECTRE III para o sistema ART

6.2.1. Cenário 1 - 1000 passageiros/hora/direção

No **Quadro 6.1**, encontram-se presentes os valores de custo de exploração limite (a azul), necessários para que o sistema ART seja preferível em relação às outras 9 alternativas.

Quadro 6.1 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART – cenário 1

ELECTRE III								
Classificação	W_{REF}		W_I		W_{II}		W_{III}	
	a_i	C.Expl. (M€/ano)	a_i	C.Expl. (M€/ano)	a_i	C.Expl. (M€/ano)	a_i	C.Expl. (M€/ano)
1º	a5; a8; a10	≤ 3,15	a8; a10	≤ 3,05	a5	≥ 0,00	a3; a10	≤ 2,40
1º	a5; a8	≥ 3,20	a8	≥ 3,10	-	-	a3	≥ 2,45

Analisando o quadro em questão, verifica-se que, o sistema ART nunca terá uma distinção preferível face às restantes alternativas. Em relação ao grupo de pesos W_{II} , o sistema ART nunca poderá ser o preferível, nem se tiver um custo de exploração igual a 0,00€. No que diz respeito aos grupos de pesos de referência (W_{REF}), de desempenho de sistema (W_I), e dos aspetos ambientais e urbanísticos (W_{III}), o sistema ART é indiferente face a várias alternativas apresentadas no quadro, não garantindo a categoria de preferência face às alternativas em questão. Desta forma, é possível afirmar que, neste cenário, o sistema ART não é viável.

Este resultado pode ser consequência do enorme custo associado à infraestrutura e ao material circulante para uma reduzida procura, adicionado ao facto de este sistema não cumprir o intervalo máximo de 6 minutos, definido pelo IMTT (2011), penalizando assim a sua classificação.

6.2.2. Cenário 2 - 2000 passageiros/hora/direção

Para uma procura imposta de 2000 passageiros por direção-hora, foram obtidos os limites de custos de exploração anuais que dão preferência ao sistema ART e que estão expostos no **Quadro 6.2**.

Quadro 6.2 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 2

ELECTRE III								
Classific ação	W _{REF}		W _I		W _{II}		W _{III}	
	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)
1º	a10	≤ 10,75	a10	≤ 12,85	a10	≤ 7,40	a10	≤ 8,25
1º	a8; a10	10,80 – 13,20	a3; a8; a10	12,90 – 13,80	a8; a10	7,45 – 9,25	a3; a10	8,30 – 12,55
1º	a8	≥ 13,25	a3; a8	≥ 13,85	a8	≥ 9,30	a3	≥ 12,60

Em relação às soluções obtidas, foi possível retirar valores associados aos custos de exploração máximos do ART, que fazem com que este sistema se torne o preferível face às restantes alternativas. O valor obtido, segundo o grupo de pesos que enfoca o desempenho do sistema (W_I), é o valor de custo de exploração que garante, com uma maior margem, a preferência do sistema ART face às restantes 9 alternativas, uma vez que, apresenta o maior valor limite para o qual o sistema ART é viável, com um valor igual a 12,85M€/ano. E, em comparação com as restantes alternativas este valor está bastante próximo do valor máximo do custo de exploração das restantes alternativas, obtido via análise económica, este que pertence ao sistema TVR (a6), de valor igual 12,80M€/ano, assegurando uma maior viabilidade de ser implementado.

Por outro lado, para os grupos de pesos W_{II} e W_{III}, os valores iterados obtidos do custo de exploração são inferiores ao menor valor de custo de exploração das restantes alternativas, cujo valor mínimo é assegurado pelo sistema de elétrico (a4), de valor igual a 9,48M€/ano, diminuindo a credibilidade de o sistema ART poder ser viável com os valores apresentados.

6.2.3. Cenário 3 - 3000 passageiros/hora/direção

Para um cenário 3, as soluções obtidas respetivas ao custo máximo de exploração anual do ART, para que este se torne o mais promissor em relação às restantes 9 alternativas em estudo, estão apresentadas no **Quadro 6.3**.

Quadro 6.3 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 3

ELECTRE III								
Classific ação	W _{REF}		W _I		W _{II}		W _{III}	
	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)
1º	a10	≤ 14,95	a10	≤ 17,85	a10	≤ 8,80	a10	≤ 10,75
1º	a8; a10	15,00 – 18,35	a3; a8; a10	17,90 – 19,30	a8; a10	8,85 – 12,05	a3; a10	10,80 – 17,40
1º	a8	≥ 18,40	a3; a8	≥ 19,35	a8	≥ 12,10	a3	≥ 17,45

Observando as soluções obtidas para este cenário, verifica-se que, à semelhança dos resultados obtidos para o cenário 2, os limites de custo de exploração dos grupos de pesos W_{II} e W_{III} continuam inferiores ao menor valor de custo de exploração anual apresentado pelas restantes alternativas, calculado segundo a análise económica, que corresponde ao sistema de elétrico (a4), de valor igual a 13,07M€/ano.

6.2.4. Cenário 4 - 4000 passageiros/hora/direção

No **Quadro 6.4** encontram-se presentes as soluções relativas aos limiares máximos de custo de exploração do sistema ART, para uma procura imposta de 4000 passageiros por direção-hora, que garantem a 1ª posição deste sistema, aquando da escolha do melhor sistema de transporte.

Quadro 6.4 – Custos de exploração anuais máximos que preferenciam o sistema ART - cenário 4

ELECTRE III								
Classificacão	W_{REF}		W_I		W_{II}		W_{III}	
	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)	ai	C.Expl. (M€/ano)
1º	a10	≤ 23,80	a10	≤ 25,45	a10	≤ 24,45	a10	≤ 25,20
1º	a4; a10	23,85 – 25,60	a4; a10	25,50 – 28,45	a4; a7; a10	24,50 – 27,35	a4; a7; a10	25,25 – 25,60
1º	a4	≥ 25,65	a4	≥ 28,50	a4; a7	≥ 27,40	a4; a7	≥ 25,65

Com base nos resultados obtidos retira-se que, todos os custos de exploração máximos necessários, para que o sistema ART seja eleito como o melhor, são superiores ao custo de exploração máximo das restantes 9 alternativas, segundo a análise económica, cujo valor pertence ao sistema de autocarros em via banal (a1), com um custo de exploração igual a 22,20M€/ano.

6.2.5. Análise global dos resultados

Em síntese, procedeu-se à compilação dos resultados dos custos de exploração máximos que o sistema ART pode obter, de modo a que seja o sistema de eleição face às restantes 9 alternativas. Esta compilação de resultados encontra-se presente no **Quadro 6.5**, juntamente com o valor do custo de exploração mínimo e máximo, que as restantes alternativas apresentam para cada cenário, segundo a análise económica desenvolvida no Capítulo 5 (**Quadro 5.19**).

Quadro 6.5 – Resumo dos custos de exploração máximos que preferenciam o sistema ART

Cenários	Custos de exploração máximos obtidos pelo ELECTRE III [M€/ano]				Custos de exploração das restantes alternativas via análise económica [M€/ano]	
	W_{REF}	W_I	W_{II}	W_{III}	Mínimo	Máximo
Cenário 1	3,15	3,05	0,00	2,40	6,00 – a9	7,78 – a6
Cenário 2	10,75	12,85	7,40	8,25	9,48 – a4	12,80 – a6
Cenário 3	14,95	17,85	8,80	10,75	13,07 – a4	17,38 – a1
Cenário 4	23,80	25,45	24,45	25,20	14,85 – a4	22,20 – a1

Analisando o quadro em questão, observa-se que existem células coloridas, nos valores que foram iterados. Esta avaliação serve para verificar que valores de limites máximos de custos de exploração,

que fazem com que o sistema ART seja o preferível, estão enquadrados dentro dos valores de custos de exploração, apresentados pelas restantes alternativas. Desta forma, quanto maior for a diferença do limite do custo de exploração do ART em relação ao custo mínimo de exploração anual apresentado pelas restantes alternativas, maior será a possibilidade de este se tornar viável para a sua implementação. Assim, no quadro em destaque, são realçados a vermelho os valores limite de custo de exploração do ART que são inferiores aos custos mínimos de exploração das restantes alternativas, para cada cenário. Por outro lado, estão enfocados, a amarelo, os valores de custo de exploração que dão preferência ao sistema ART e que estão compreendidos entre os valores máximos e mínimos dos custos de exploração das restantes alternativas. Por último, estão destacados a verde, os valores limite de custo de exploração do ART que são superiores aos custos máximos de exploração das restantes alternativas, para cada cenário.

De modo, a se obter uma maior validação da viabilidade da escolha do sistema ART face às restantes alternativas, foi estimado o custo de exploração anual deste sistema, via análise económica exposta no Capítulo 5. Como existe uma escassa informação sobre esta alternativa, procedeu-se à sua análise económica tendo em conta o sistema de guiamento do Irisbus e o sistema de captação de energia do elétrico, uma vez que, como comentado anteriormente, no Capítulo 3, este sistema de transporte é uma mescla entre estes os dois sistemas em questão. Além disso, de modo a garantir uma maior margem de segurança em relação ao valor real, ao resultado obtido desta análise económica, será aplicado um coeficiente de segurança 1,1. Os valores obtidos desta análise económica, realizada para cada cenário, encontram-se expostos no **Quadro 6.6**.

Quadro 6.6 – Estimativa dos custos de exploração do sistema ART via análise económica

Custos de exploração do sistema ART via análise económica [M€/ano]				
Alternativa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
a10	6,26	9,04	12,85	14,74

No **Quadro 6.7**, encontra-se uma síntese do que seria a validação dos valores associados aos custos de exploração do sistema ART, para os vários cenários. Nesta possível validação estão coloridos a vermelho os valores de custos de exploração que permitiriam ao ART ser o preferível a implementar, mas cujos valores são inferiores aos custos de exploração estimados para o ART via análise económica, e estão coloridos a verde os valores de custos de exploração que permitiriam ao ART ser o preferível a implementar, e cujos valores são superiores aos custos de exploração estimados para o ART.

Quadro 6.7 – Estimativa da validação dos valores associados aos custos de exploração do sistema ART

Custos de exploração máximos do sistema ART via ELECTRE III [M€/ano]					Custos de exploração do sistema ART via análise económica [M€/ano]
Cenários	W _{REF}	W _I	W _{II}	W _{III}	-
Cenário 1	3,15	3,05	0,00	2,40	6,26
Cenário 2	10,75	12,85	7,40	8,25	9,04
Cenário 3	14,95	17,85	8,80	10,75	12,85
Cenário 4	23,80	25,45	24,45	25,20	14,74

Comparando os resultados do **Quadro 6.5** e do **Quadro 6.7**, verifica-se que as conclusões obtidas são bastante similares, em consequência do facto da estimativa do custo de exploração anual do sistema ART ser inferior ao custo de exploração anual mínimo das restantes alternativas, para todos os cenários, à exceção do cenário 1, cujo valor é bastante próximo do valor mínimo de custo de exploração, pertencente ao sistema Phileas. Desta forma, concluiu-se que apenas para o cenário 4 (4000 passageiros por hora-direção) é garantida uma total viabilização para a implementação do sistema ART, visto que, todos os valores obtidos segundo o método ELECTRE III são superiores aos valores máximos do custo de exploração das restantes alternativas (**Quadro 6.5**). E são, inclusive, superiores aos valores da estimativa dos custos de exploração do sistema ART via análise económica (**Quadro 6.7**).

6.3. Conclusões do capítulo

No presente capítulo, testou-se a viabilidade da implementação de um novo sistema guiado, denominado ART, através do método hierárquico ELECTRE III. Para a realização desta hipótese, tornou-se como variável dependente o critério relacionado com custo de exploração anual. Assim sendo, efetuaram-se várias iterações de custos de exploração anual de modo a estimar o valor limite de custo de exploração, que dá preferência ao sistema ART em relação às restantes 9 alternativas.

Através da metodologia efetuada foi possível verificar quais os cenários para o qual o sistema ART seria o mais viável. Neste caso, foi demonstrado que para o cenário 4, com uma procura horária de 4000 passageiros por direção, é viável implementar o sistema ART, uma vez que, todos os valores limites de custos de exploração iterados são superiores aos valores estimados de custos de exploração do sistema ART. Adicionalmente, é também possível identificar que o sistema ART é mais vantajoso em termos de desempenho de sistema, visto que, é no grupo de pesos W_i , que o sistema ART poderá ter um maior custo de exploração e, no entanto, continuar a ser a alternativa preferida.

Esta análise foi de execução relativamente fácil, apesar de arcaica, através de várias iterações. Assim, foi possível descobrir, com rapidez, o ponto de inflexão que torna o sistema ART, o preferível. No entanto, a presente análise peca na imprecisão dos dados submetidos. Como o sistema ART ainda está em fase de testes, não existem dados oficiais sobre diversos critérios. Sendo que, como comentado anteriormente, os critérios relacionados com os custos associados a este sistema de transporte são os mais imprecisos.

Em complemento à análise realizada neste capítulo, seria de interesse efetuar uma ACB em relação ao sistema ART e aos sistemas de transporte eleitos como os melhores. Assim, obter-se-ia um valor final de investimento de cada sistema de transporte. Num outro cenário também seria pertinente realizar uma análise económica relativa aos custos de construção do sistema ART.

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. Conclusões

Esta dissertação de mestrado assumiu como meta analisar a viabilidade da implementação de sistemas não convencionais guiados de transporte público, em zona urbana. Todos os objetivos estipulados no presente estudo foram cumpridos.

Em primeiro lugar, realizou-se uma revisão de literatura enfocada nos sistemas convencionais de transporte público rodoviários (autocarro) e ferroviários (elétrico). A grande diferença entre estes dois sistemas de transporte está na presença de guiamento. O sistema rodoviário não é guiado, sendo bastante flexível, porém possui um nível de desempenho operacional fraco e uma atratividade baixa. Em relação ao sistema ferroviário, este é guiado, sendo caracterizado como rígido. No entanto, este sistema apresenta um bom nível de desempenho operacional e uma boa atratividade para com a população. Além disso, recolheu-se também informação relativa à infraestrutura, veículos, operacionalidade e custos associados.

Com base nas características dos sistemas convencionais de transporte rodoviário e ferroviário, procedeu-se a uma pesquisa detalhada sobre sistemas de transporte não convencionais, que possuíssem a componente flexível do sistema rodoviário, associado a um bom nível de desempenho operacional, do sistema guiado ferroviário. Assim, foram identificados os seguintes 4 sistemas de transporte público: sistema guiado mecânico (SGMec), sistema guiado com carril intermédio (SGCI), sistema guiado ótico (SGO) e sistema guiado magnético (SGMagn). Em cada sistema detalhou-se a sua origem, objetivo, principais características e custos associados. Além disso, foi elaborada uma sucinta análise a cada sistema de transporte, a fim de definir as suas vantagens e desvantagens.

Através de uma análise aos sistemas de transporte não convencionais observou-se que estes ainda não estão devidamente aprimorados, existindo ainda vários problemas em relação ao tipo de guiamento. Além disso, estão ainda a ser realizados vários estudos para desenvolver estes sistemas de transporte, dando-se ênfase ao sistema *Autonomous Rail Rapid Transit* (ART), com guiamento ótico.

Após a recolha de informação dos sistemas de transporte convencionais e não convencionais realizou-se uma análise comparativa, que contempla um resumo das principais características de cada sistema, a nível do tipo de veículo, operacionalidade, infraestruturas e custos.

Com o objetivo de ir ao encontro da meta da presente dissertação, investigou-se qual seria o melhor instrumento de análise para avaliar qualitativamente os sistemas de transporte em meio urbano. Assim, optou-se por escolher a análise multicritério.

Dentro do tipo de instrumento de análise, apresentaram-se vários métodos de análise multicritério, juntamente com as suas finalidades. Sendo que, os métodos ELECTRE III e ELECTRE IV foram os eleitos para a análise qualitativa pretendida.

A metodologia aplicada à análise qualitativa dos sistemas de transporte passou por introduzir vários valores de procura horária, de modo a observar a variação do desempenho classificativo destes sistemas. Para aplicar esta metodologia foi necessário, em primeiro lugar: pré-definir um cenário base, onde se estipularam algumas condições transversais a todos os sistemas de transporte, para futuros cálculos; definir as alternativas a analisar, com base nos sistemas de transporte apresentados anteriormente; criar vários cenários fomentadores da análise, através de vários valores de procura diária por direção; e definir os critérios a avaliar, tendo como base estudos de literatura anteriores. De seguida, pontuou-se cada critério numa escala própria para cada um, à exceção dos critérios relacionados com os custos e com o ruído, onde se mantiveram os valores reais. Em relação aos custos de exploração efetuou-se uma análise económica a cada alternativa, para cada cenário, com base no estudo de An (2011). Como último passo, prévio à execução dos métodos de análise multicritério, estabeleceram-se os limiares e pesos atribuídos a cada critério. Apenas o método ELECTRE III considera a ponderação de pesos diferentes entre critérios.

Com todos os passos da metodologia estabelecidos, foi possível executar o método ELECTRE III e IV, em relação aos 4 cenários de procura criados. Posteriormente, foram analisadas as soluções obtidas, destacando-se que, o sistema Irisbus é o eleito para uma procura horária de valor igual ou inferior a 3000 passageiros por direção e, por outro lado, o sistema de elétrico é o preferível para uma procura horária de valor igual ou superior a 4000 passageiros por direção.

Para finalizar, foi realizada uma análise à viabilidade da introdução do sistema ART no mercado, através do método ELECTRE III. Como metodologia aplicada, tornou-se como variável dependente os custos de exploração e realizaram-se várias iterações, de modo a descobrir a partir de que valor o sistema ART passaria a ter preferência, em relação às restantes alternativas. Após os resultados obtidos, concluiu-se que, à semelhança do sistema de elétrico, o sistema ART tem uma grande viabilidade de ser introduzido no mercado para uma procura horária de valor igual ou superior a 4000 passageiros por direção.

7.2. Desenvolvimentos futuros

No seguimento desta dissertação, identificam-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Realizar uma ACB às alternativas com melhor classificação;
- Assim que disponível, atualizar a informação sobre o sistema ART;
- Aplicar o método de análise desenvolvido a um caso prático, com dados reais;
- Validar todos os critérios, bem como os pesos e os limiares atribuídos;
- Realizar uma análise económica em relação aos custos de construção dos vários sistemas;
- Fazer variar os limiares atribuídos ao método ELECTRE, tal como fez Solecka (2014);
- Utilizar outro método de AMC, como por exemplo o MACBETH, um método claro e *user-friendly*, que procura combater incertezas e imprecisões através de várias perguntas sobre a atribuição de pesos aos critérios. Além disso, possui várias ferramentas de análise à robustez e sensibilidade e atribui uma pontuação global a cada alternativa (Costa, et al., 2003);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Publicações escritas

An, Jeong-Hwa. (2011). *Le choix d'un système de transport durable: analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface.* (Tese de doutoramento). Université Paris-Est. Disponível em: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00834819>, consultado em: julho de 2019.

Arias, Francisco G. Alvarado. (2016). *El Trolebús, una alternativa de transporte público que genera ciudades sustentables.* 13° Foro de Eficiencia Energética en el Transporte: e-Movilidad. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Disponível em: <https://docplayer.es/35764202-El-trolebus-una-alternativa-de-transporte-publico-que-genera-ciudades-sustentables-m-en-i-francisco-g-alvarado-arias.html>, consultado em: maio de 2019.

Bana e Costa, Carlos; De Corte, Jean-Marie e Vansnick, Jean-Claude. (2003). *MACBETH. (Overview of MACBETH multicriteria decision analysis approach).* International Journal of Information Technology and Decision Making. 11. Páginas: 359-387. ISBN: 0 7530 1520 X.

Barfod, Michael Bruhn e Leleur, Steen. (2014). *Multi-criteria decision analysis for use in transport decision making.* DTU Transport Compendium Series part 2. Department of Transport, Technical University of Denmark. 2nd edition. Denmark. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/multi-criteria-decision-analysis-for-use-in-transport-decision-ma>, consultado em: janeiro de 2020.

Bentley, Dr Jim, et al. (2016). *Emerging Technologies for Rapid Transit: Part Two An Evaluation of Specific Technologies.* JMAC Report 2016/01. Department of Civil and Environmental Engineering the University of Auckland, New Zealand. Project number: 35240.001. Disponível em: http://www.aucklandforecastingcentre.org.nz/pdfs/JMAC_Report2016-01_EmergingTechRapidTransit-Part1_Apr16.pdf, consultado em: maio de 2019.

Bertucci, Jonas de Oliveira. (2011). *Os benefícios do Transporte Coletivo.* Boletim regional, urbano e ambiental. Páginas: 77-87.

Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5652/1/BRU_n5_beneficios.pdf, consultado em: abril de 2019.

Bourget, Christian e Labia, Patrick. (2010). *Mission de diagnostic et de prospective sur les réseaux de transports urbains de Caen et Nancy.* Relatório definivo n° 006782-01. Conseil Général de L'environnement et du Développement Durable. La Défense. Disponível em: <https://www.vie-publique.fr/rapport/31451-mission-de-diagnostic-et-de-prospective-sur-les-reseaux-de-transport-ur>, consultado em: setembro de 2019.

BRT-UK. (2007). *Buses as Rapid Transit: A transport revolution in waiting.* (Panfleto). Buses Focus 47. Edinburgh. Disponível em: http://www.brtuk.com/wp-content/uploads/2014/11/brochure_may_2007.pdf, consultado em: abril de 2019.

Carris. (2018). *Relatório e Contas 2018*. Lisboa. Disponível em: <https://www.carris.pt/a-carris/empresa/relatorios-e-legislacao/>, consultado em: abril de 2019.

Ceney, Heather. (2017). *Guided Busway - Design Handbook*. 2017 Edition. Wokingham, Inglaterra. ISBN 0-9548485-1-9.

CERTU. (2013). *Choisir un mode de transport capacitaire: L'exemple de villes méditerranéennes*. Collection Dossiers n°266. Lyon. ISBN: 978-2-11-131057-5. ISSN: 0247-1159.

CERTU (2005). *Les Systemes Techniques De Transports Collectifs*. Les Techniques, Fiche 4.1. Transport Urbain – l'Essentiel, exemple du Languedoc-Roussillon. Disponível em: http://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/F41-systemes_techniques_du_TCU_cle7969cf.pdf, consultado em: novembro de 2019.

Cervero, Robert. (2013). *Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport*. UC Berkeley: Institute of Urban and Regional Development. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4sn2f5wc>, consultado em: abril de 2020.

Choudhary, Anand Kumar e Rao, Dr. Srinivas. (2018). *History of Rail Transportation and Importance of Indian Railways (IR) Transportation*. International Journal of Engineering Development and Research. Volume 6, Issue 3. MATS University, Raipur, Chhattisgarh, India. ISSN: 2321-9939

City of Nagoya. (S.d.). *Connecting People and Communities to Tomorrow: The Yutorito Line*. Disponível em: <http://www.city.nagoya.jp/en/page/0000032724.html>, na seção: Housing & City Planning Bureau, consultado em: maio de 2019.

Civitas. (2016). *Smart choices for cities: Alternative Fuel Buses*. Disponível em: <https://civitas.eu/tool-inventory/civitas-policy-note-smart-choices-cities-alternative-fuel-buses>, consultado em abril de 2019.

Clean fleets. (2014). *Clean Buses – Experiences with Fuel and Technology Options*. Disponível em: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20140310_111433_57746_Clean_Buses__Experiences_with_Fuel_and_Technology_Options.pdf, consultado em: maio de 2019.

COST. (2011). *Buses with High Level of Service: Fundamental characteristics and recommendations for decision making and research*. Final report. ISBN: 978-2-11-099577-3

Costa, Américo Henrique Pires da. (2018). *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes: Transportes Públicos*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDRn). Fascículo número 13. Disponível em: http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasconcelos/Documentos/ManualdeAcessibilidades/ManuaisCCDRNmiolo_AF/13TransPub_AF.pdf, consultado em: novembro de 2019.

COTITA. (2009). *Transports à Haut Niveau de Service: TCSP de Maubeuge*. CERTU/CETE BHNS. 2009. Disponível em: http://www.cotita.fr/IMG/pdf_Fiche_Maubeuge.pdf, consultado em: setembro de 2019.

Coulls, Anthony. (1999). *Railways as World Heritage Sites*. Occasional Papers for the World Heritage Convention. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), Paris. Disponível em: <https://www.icomos.org/studies/railways.pdf>, consultado em: abril de 2019.

Currie, Graham. (2006). *Bus Rapid Transit in Australasia: Performance, Lessons Learned and Futures*. Journal of Public Transportation, BRT Special Edition. DOI: <http://doi.org/10.5038/2375-0901.9.3.1>.

Cushing, Richard e Leigh, Edward. (2017). Cambridgeshire Guided Busway Defects. Versão 1q. Disponível em: <https://www.smartertransport.uk/wp-content/uploads/2017/07/Guided-Busway-Defects-1p.pdf>, consultado em: agosto de 2019.

Desbazeille, Bertrand e Koenig, Jean-Gérard. (2003). *Expertise sur la sécurité du système de guidage du transport sur voie réservée Nancy et Caen*. N° d'affaire: 004149-01. CONSEIL GENERAL DES PONTS ET CHAUSSEES (CGPC). Disponível em: <https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0003986>, consultado em: agosto de 2019.

Dias, Juscelino Almeida; Figueira, José Rui e Roy, Bernard. (2006). *The software ELECTRE III-IV methodology and user manual (Version 3.X)*. ISSN 1646-2955. N° 4/2006.

Dudek, Mariusz, Solecka; Katarzyna e Richter, Matthias. (2018). *A multi-criteria appraisal of the selection of means of urban passenger transport using the electre and ahP methods*. DOI: 10.4467/2353737XCT.18.088.8693.

Ellis, S; Ceney, H e Hassan, K. (2005). *Integration of guided busways in the urban environment*. International Seminar on Urban Pavements – Contribution to Sustainable Development. Disponível em: https://www.piarc.org/ressources/documents/988,Ellis-et-al-_Guided-Busway-Paper_24.pdf, consultado em: maio de 2019.

EREA; ingérop; SYSTRA. (2005). *Etude De Faisabilite Des Extension Du Reseau De TCS (3ème phase)*. Rapport etape 2. Edition 2. Réf: 3935/PLT/BDX/ 302-04.

ERRAC; UITP. (2012). *Metro, light rail and tram systems in Europe*. Disponível em: <https://www.uitp.org/metro-light-rail-and-tram-systems-europe>, consultado em: maio de 2019.

Estévez, Javier Bueno. (2016). *Tranvía de Medellín, primer sistema de tranvía moderno de Latinoamérica*. Revista de Obras Públicas: Organo profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos. N°. 3572. Páginas: 98-106. ISSN 0034-8619.

Fai, Tan Chee. (2008). *PHILEAS: The Bus Rapid Transit*. Jurutera. Páginas: 12-16. Disponível em: <http://dspace.unimap.edu.my/xmlui/bitstream/handle/123456789/15694/Feature-PHILEAS%204pp.pdf?sequence=1>, consultado em: setembro de 2019.

Federal Transit Administration. (2005). Las Vegas Metropolitan Area Express. *Bus Rapid Transit (BRT) Demonstration Project*. Project No: FTA VA-26-7222-2005.1. Disponível em: https://nrbti.org/wp-content/uploads/2017/05/Las_vegas_final_report.pdf, consultado em: agosto de 2019.

Fernandes, Sérgio. (2013). *Desenvolvimento de ferramentas de apoio multicritério à decisão de problemas de localização.* (Tese de douturamento). Universidade de Lisboa. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/10603>, consultado em: outubro de 2019.

Foot, Robin e Doniol-Shaw, Ghislaine. (2010). *Une machine en panne qui continue de fonctionner ou la résilience d'une ligne de bus "avec" guidage optique.* 45ème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française: Fiabilité, Adaptation et Résilience. Version 2. Liège, Belgique. Disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00514419>, consultado em: agosto de 2019.

Foot, Robin e Ghislane, Doniol-Shaw. (2003). *La norme contre le travail? Interrogations autour du tramway de Nancy.* Groupement pour l'Étude des Transports Urbains Moderne. Transports Urbains n° 105. Páginas: 20-26. ISSN 0397-6521.

Freitas, André Luís Policani; Peixoto, Frederico Saad e Suett, Waidson Bitão. (2004). *Seleção de equipamentos: uma análise decisória utilizando os métodos ELECTRE III e IV.* Artigo de conferência, XXXVI-SBPO: O impacto da Pesquisa Operacional nas Novas Tendências Multidisciplinares. DOI: 10.13140/2.1.5149.1845.

Gobierno de España. (2016). *El transporte urbano y metropolitano en España.* Ministerio de Fomento, Secretaría General de Transporte, Dirección General de Transporte Terrestre. 1ª edición electrónica. Disponível em: <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=TTW084>, consultado em: abril de 2019.

Gregg, Rob e Pessaro, Brian. (2016). *Vehicle Assist and Automation (VAA) Demonstration Evaluation Report.* FTA Report N° 0093. Federal Transit Administration. DOI: <https://doi.org/10.21949/1503485>.

Guarini, M.R.; Battisti, F. e Chiovitti, A. (2018). *A Methodology for the Selection of Multi-Criteria Decision Analysis Methods in Real Estate and Land Management Processes.* Sustainability, 10, 507. DOI: 10.3390/su10020507.

Guerrieri, Marco. (2019). *Catenary-Free Tramway Systems: Functional and Cost–Benefit. Analysis for a Metropolitan Area.* Urban Rail Transit 5. Páginas: 289–309. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-019-00118-y>.

Guigueno, Vincent. (2009). *De l'histoire des transports à l'histoire de la mobilité? Secção: L'intrigante nouvelle disparition du tramway en France.* Robin Foot. Páginas: 315-326. Presses Universitaires de Rennes, Renex. ISBN: 978-2-7535-0908-5.

Hedges, Cody J. e West, Dr. John. (2017). *Technologies for precision docking at level-boarding platforms for bus rapid transit systems using low-floor buses.* Ball State University, Muncie, Indiana. Disponível em: <http://cardinalscholar.bsu.edu/handle/123456789/200849>, consultado em: setembro de 2019.

Heijden, Robert van der, et al. (2005). *Innovating urban public transport: some recent developments in the Netherlands*. DOI: 10.2495/978-1-85312-799-1/04.

Hiroiyuki, TAKESHITA; Kazuhiro, SHIMIZU e Hirokazu, KATO. (2006). *Evaluation of Bus Rapid Transit System in Nagoya city*. 89th Transportation Research Board annual meeting. Disponível em: http://www.urban.env.nagoya-u.ac.jp/strategy/paper/2008/kokusai/08k_takeshita1.pdf, consultado em: maio de 2019.

IMTT. (2014). *Casos de boas práticas em sistemas de transportes flexíveis*. Gabinete de Planeamento, Inovação e Avaliação. Disponível em: http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Planeamento/Documents/AMP/boas_praticas_transportes_flexiveis.pdf, consultado em: abril de 2019.

IMTT. (2011). *Tipologias de meios e modos de transporte*. Coleção de brochuras técnicas/temáticas. Disponível em: http://server109.webhostingbuzz.com/~transpor/conferenciamobilidade/pacmob/tipologia/Tipologia_de_meios_e_modos_de_transportes.pdf, consultado em: maio de 2019.

Infante, Carlos Eduardo Durange de Carvalho; Mendonça, Fabricio Molica de e Valle, Rogerio de Aragão Bastos do. (2014). *Análise de robustez com o método Electre III: o caso da região de Campo das Vertentes em Minas Gerais*. Volume 21, nº 2. Páginas: 245-255. ISSN: 0104-530X. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X958>.

Kenneth G. Sislak. (S.d.). *Cleveland HealthLine Bus Rapid Transit*. Greater Cleveland Regional Transit Authority. AECOM. Disponível em: <https://www.ite.org/pub/?id=54322fd1%2D94e9%2D7dc1%2D042d%2D8948c891a4ae>, consultado em: abril de 2019.

King, Charles, et al. (2015). *Innovative Technologies for Light Rail and Tram: A European reference resource*. Briefing Paper 1: Tyre Innovation - Rubber Tyre Trams. Sintropher, University College London. Disponível em: <https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/rubber-tyre-trams-2-finalpolis.pdf>, consultado em: maio de 2019.

Kodukula, Santhosh K. (2010). *Bangkok Rapid Transit: BRT System of Bangkok, Thailand*. Short survey. Case Studies in Sustainable Urban Transport #1. DOI: 10.13140/RG.2.2.16345.42083.

L'Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable (ICEDD). (2008). *Les systèmes de transport collectif structurants*. La CeMathèque. N° 26. Disponível em: <http://mobilite.wallonie.be/home/centre-de-documentation/cematheque.html>, consultado em: julho de 2019.

Lewis, Dr. M. J. T. (2001). *Railways in the Greek and Roman World*. University of Hull. Páginas: 8-19.
Disponível em:
<http://www.yieldopedia.com/paneladmin/reports/fb8f151d1ee5d60af0482d429fd27c10.pdf>, consultado em: julho de 2019.

Litman, Todd. (2020). *Evaluating Public Transit Benefits and Costs: Best Practices Guidebook*. Victoria Transport Policy Institute. Disponível em: <https://www.vtpi.org/tranben.pdf?b81542c0>, consultado em: abril de 2020.

Llombart, Ángel Sustaeta. (2012). *Proyecto del servicio público de transporte de viajeros en la línea 1 del TRAM de Castellón: UJI - El Grao de Castellón*. Generalitat Valenciana, Conselleria d'infraestructures, territori i medi ambiente.

London Guided Busway. (S.d.). London Guided Busway. *Guided Bus Explained*. Document number 4. Disponível em: <http://londonguidedbusway.co.uk/proposal.php>, consultado em: abril de 2019.

London Guided Busway. (S.d.). London Guided Busway. *Guided Bus in Action*. Document number 5. Disponível em: <http://londonguidedbusway.co.uk/proposal.php>, consultado em: abril de 2019.

Macura, Dragana, et al. (2011). A model for prioritization of rail infrastructure projects using ANP. *Internazionale di Economia dei Trasporti/International Journal of Transport Economics*. XXXVIII. Páginas: 265-289.
Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/235993969_A_model_for_prioritization_of_rail_infrastructure_projects_using_ANP, consultado em: outubro de 2019.

Martinez, Albert. (2012). *Energy Innovation and Transport: The Electrification of Trams in Spain, 1896–1935*. *Journal of Urban Technology*. Volume 19. Nº 3. DOI: 10.1080/10630732.2011.642571.

Menzies, Bob. (2011). *Cambridgeshire Guided Busway: Open for Business*. Polis Conference Brussels 29th November 2011. Cambridgeshire County Council. Disponível em: https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/cambridgeshire-guided-busway_open-for-business.pdf, consultado em: abril de 2019.

New Civil Engineer. *Manchester guided bus shuns precast*. Disponível em: <https://www.newcivilengineer.com/archive/manchester-guided-bus-shuns-precast-08-07-2014/>, consultado em: abril de 2020.

Nicolai, Joaquín C e Weiss, Dietmar M. (2008). *Influences of operational issues on the operational cost of BRT buses and BRT systems*. *Proceedings of the 27th Southern African Transport Conference*. ISBN: 978-1-920017-34-7.

NZ Transport Agency. (2017). *Advanced Bus Solution: Appendix*. Disponível em: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/advanced-bus-solution/Advanced-bus-solution-final-report-appendix.pdf>, consultado em: novembro de 2019.

Observatório do QREN. (2013). *A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico, MANUAL TÉCNICO II: Métodos e Técnicas Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação: Análise Multicritério.*

Disponível em:

https://www.academia.edu/31207692/A_Avalia%C3%A7%C3%A3o_do_Desenvolvimento_Socioecon%C3%B3mico_MANUAL_T%C3%89CNICO_II_M%C3%A9todos_e_T%C3%A9cnicas_Instrumentos_de_Enquadramento_das_Conclus%C3%B5es_da_Avalia%C3%A7%C3%A3o_An%C3%A1lise_Multicrit%C3%A9rio_Instrumentos_de_Enquadramento_das_Conclus%C3%B5es_da_Avalia%C3%A7%C3%A3o, consultado em: outubro de 2019.

Office of Planning and Environment; Federal Transit Administration; U.S. Department of Transportation. (2012). *Euclid Corridor Transportation Project: Before-and-After Studies of New Starts Projects.* Disponível em: <https://www.transit.dot.gov/funding/grant-programs/capital-investments/and-after-studies-new-starts-projects>, consultado em: maio de 2019.

Olmos, María; Gil, Maite e Canela, Sergi. (2007). *Specification of vehicles.* European Commission DG Research. CityMobil. Disponível em: <https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/d5.4.1-ii-pu-final-ex-post-report-part-4-citymobil.pdf>, consultado em: agosto de 2019.

Parkinson, Tom e Fisher, Ian. (1996). *Rail Transit Capacity.* Transit Cooperative Research Program. Report 13. National Academy Press, Washington D.C. ISSN: 1073-4872. ISBN: 0-309-05718-3.

Parsons Brinckerhoff. (2010). *Stirling City Centre Light Rail Feasibility Study - Phase 2: Stirling City Centre Light Rail Feasibility Study - Phase 2.* Public Transport Authority of WA, Australia. DOI: 10-0477-02-2106689A.

Pequignot, A. (2014). *High-Class Transit in Aalborg. High Performance Bus. Benchmark of Bus Rolling Stock for BRT System, Technical Note.* SYSTRA, COWI. Disponível em: https://www.aalborg.dk/media/8217595/brt_aalborg_rollingstock.pdf, consultado em: julho de 2019.

Pereira, Valdecy. (2017). *MCDA-05-ELECTRE IV.* DOI:10.13140/RG.2.2.20581.70887.

Pereira, Valdecy. (2017). *MCDA-04-ELECTRE III.* DOI: 10.13140/RG.2.2.13870.82241.

Pessaro, Brian e Caleb Van Nostrand. (2011). *An Evaluation of the Cleveland HealthLine Mechanical Guide Wheel.* Final report. Report number: FTA- FL- 26-7110.2011.2. Disponível em: https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/Cleveland_Mechanical_Guide_Wheel_Evaluation_FINAL_-_508_Format.pdf, consultado em: junho de 2019.

Peter Newman, et al. (2018). *The Trackless Tram: Is It the Transit and City Shaping Catalyst We Have Been Waiting for?* Journal of Transportation Technologies. Nº 09. Página: 31-55. ISSN: 2160-0481. DOI: <https://doi.org/10.4236/jtts.2019.91003>.

Phillips, David. (2006). *An Update on Curb Guided Bus Technology and Deployment Trends*. Journal of Public Transportation. Nº 9. Páginas: 163-180. DOI: 10.5038/2375-0901.9.3.9.

Phileas, gemeente Eindhoven e Samenwerkingsverband. (2006). *Brainport's Advanced Transport System - Eindhoven*. Brochure Phileas. Disponível em: https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/12565_6013_broch_phileas_eindhoven.pdf, consultado em: novembro de 2019.

Piccirillo, Juan Martín. (2012). *Qué es un BRT, o la implementación del Metrobús en la ciudad de Buenos Aires, Argentina*. Boletín FAL. CEPAL. Edición nº312, número 8 de 2012. ISSN 1564-4243.

Profillidis, V.A. (2000). *Railway Engineering*. Second Edition. Ashgate Publishing Company, Burlington, USA. ISBN-13: 978-0754612797.

Scherer, Milena e Dziekan, Katrin. (2012). *Bus or Rail: An Approach to Explain the Psychological Rail Factor*. Journal of Public Transportation. Volume 15. Nº 1. Páginas: 75-93.
DOI: <http://doi.org/10.5038/2375-0901.15.1.5>.

SCI Verkehr GmbH. (2017). *Buses - Global Market Trends*.

Disponível em: https://www.sci.de/fileadmin/user_upload/Flyer_MC_Bus.pdf, consultado em: novembro de 2019.

Shladover, Steven E., et al. (2007). *Lane Assist Systems for Bus Rapid Transit, Volume I: Technology Assessment*. Final Report for RTA 65A0160. University of California, Berkeley. PATH Program. Richmond, California. ISSN: 1055-1425.

Siemens. (2008). *Optiguide: Guiamento óptico para Mega TrolleyBus*. Disponível em: <http://www.adfer.pt/sessoes/siemens.pdf>, consultado em: julho de 2019.

Sobral, Marcos Felipe Falcão e Paula Cabral Seixas Costa, Ana. (2008). *Modelo multicritério para classificação de clientes em distribuidoras de gás liquefeito de petróleo*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5358>, consultado em: outubro de 2019.

Solecka, Katarzyn. (2014). *ELECTRE III method in assessment of variants of integrated urban public transport system in Cracow*. Transport Problems. Volume: 9. Issue: 4. Páginas: 83-96. Cracow University of Technology, Department of Transportation Systems, Cracow, Poland. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283112729_Electre_III_method_in_assessment_of_variants_of_integrated_urban_public_transport_system_in_Cracow, consultado em: outubro de 2019.

Sousa, Bruno Carlos da Silva; Rangel, Luís Alberto Duncan e Hernández, Cecilia Toledo. (2018). *Priorização de projetos de melhoria de produtividade através do método multicritério PROMÉTHÉE II.* Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento. Volume: 10. Nº: 1. Páginas: 27-40. Universidade Federal Fluminense-UFF, Volta Redonda-RJ, Brasil. DOI: <https://doi.org/10.4322/PODes.2018.003>. ISSN 1984-3534.

STCP. (2018). *Relatório e Contas 2018.* Porto.

Disponível em: <https://www.stcp.pt/pt/institucional/governo-societario/relatorio-e-contas/>, consultado em: abril de 2019.

Systra; Cowi. (2014). *High-Class Transit in Aalborg: High performance bus.* Benchmark of bus rolling stock for BRT system. Technical note. Project nº: A047901.

Disponível em: https://www.aalborg.dk/media/8217595/brt_aalborg_rollingstock.pdf, consultado em: julho de 2019.

Takeshita, H., et al. (2009). *Evaluating Bus Rapid Transit System in Nagoya City.* 89th Transportation Research Board annual meeting.

Disponível em: https://www.isc.chubu.ac.jp/hayashi/paper/2008/kokusai/08k_takeshita1.pdf, consultado em: junho de 2019.

Tan, Han-Shue, et al. (2009). *Field Demonstration and Tests of Lane Assist/Guidance and Precision Docking Technology.* California PATH Research Report: UCB-ITS-PRR-2009-12. University of California, Berkeley. ISSN 1055-1425.

TCRP. (S.d.). *O-Bahn Guided Busway.* Adelaide, Australia.

Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp90v1_cs/adelaide.pdf, consultado em: maio de 2019.

Tom Nicols. (2009). *Luton Dunstable Busway.* Luton Borough Council. Disponível em: <https://centralbeds.moderngov.co.uk/documents/s12030/091208%20Luton%20Dunstable%20Busway.pdf?txtonly=1>, consultado em: junho de 2019.

Thuret, Manon. (2012). *Quel TCSP “nouvelle génération” pour les villes moyennes? Veille sur l’exploitation innovante et efficiente des réseaux de transports collectifs.* Master Professionnel Transports Urbains et Régionaux de Personnes. Université Lumière, Lyon. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325892665_Quel_TCSP_nouvelle_generation_pour_les_villes_moyennes_Veille_sur_l'exploitation_innovante_et_efficiente_des_reseaux_de_transports_collectifs, consultado em: junho de 2019.

Transportation Research Board Of The National Academies. (2002). *Smart Growth and Transportation: Issues and Lessons Learned.* Conference Proceedings 32. Baltimore, Maryland. ISBN: 0-309-09496-8. ISSN: 1073-1652.

Tubis, Agnieszka e Gruszczyk, Adam. (2015). *Measurement of punctuality of services at a public transport company.* Conference paper for the Carpathian Logistics Congress 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305115729_MEASUREMENT_OF_PUNCTUALITY_OF_SERVICES_AT_A_PUBLIC_TRANSPORT_COMPANY, consultado em: setembro de 2019.

Urban Transport Group. (2018). *Bus Rapid Transit.* Briefing. Version 2. Disponível em: <http://www.urbantransportgroup.org/resources/types/briefings/briefing-bus-rapid-transit>, consultado em: junho de 2019.

Velasquez, Mark e Hester, Patrick T. (2013). *An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods.* International Journal of Operations Research. Volume: 10. Nº: 2. Páginas: 56-66. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275960103_An_analysis_of_multi-criteria_decision_making_methods, consultado em: outubro de 2019.

Wang, Haichao, et al. (2017). *Developing a multicriteria decision support framework for CHP based combined district heating systems.* Applied Energy. Volume: 205. Páginas: 345-368. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.016. ISSN: 0306-2619.

Páginas Web

Agarwal, RC. (S.d.). *Advantages and Disadvantages of Railway Transport.* Disponível em: <http://www.yourarticlelibrary.com/geography/transportation/advantages-and-disadvantages-of-railway-transport/42134>, consultado em: setembro de 2019.

Alemão, Samuel. (2017). *Carris prevê expansão da rede de eléctricos com ligações à Alta de Lisboa e a Oriente.* Disponível em: <https://ocorvo.pt/carris-preve-expansao-da-rede-de-electricos-com-ligacoes-a-alta-de-lisboa-e-a-orientel/>, consultado em: março de 2020.

ALSTOM. (2018). *Alstom to supply 5 extra Citadis trams to Bordeaux Metropole.* Disponível em: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2018/8/alstom-supply-5-extra-citadis-trams-bordeaux-metropole>, consultado em: fevereiro de 2020.

American Public Transportation Association Fact Book. (2016). *Transit Buses by Fuel Type.* Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10302>, consultado em: novembro de 2019.

Arias, Fernando. (2014). *TRANSMILENIO: Bogota, Colombia | Bus Rapid Transit.* Disponível em: <http://fernandoarias.com/cities/2014/1/13/transmilenio-bogota-colombia-bus-rapid-transit>, consultado em: novembro de 2019.

Asian Development Bank. (2008). *BRT, Nagoya (Japan): The First and Most Well-Known BRT System in Japan.* Disponível em: https://sti-india-uttoolkit.adb.org/mod2/se3/005_6.html, consultado em: maio de 2019.

Attiach, Mickaël. (2011). *Nîmes inaugure son premier tram'bus*. Disponível em: https://objectif-languedoc-roussillon.latribune.fr/languedoc-roussillon/Actualites/Nimes-inaugure-son-premier-tram-bus_1838.html, consultado em: maio de 2019.

Bnamericas. (2013). *OHL se adjudica contrato de US\$94,5mn por línea de tranvía de Medellín*. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/infraestructura/ohl-se-adjudica-contrato-de-us945mn-por-linea-de-tranvia-de-medellin>, consultado em: abril de 2019.

Britpave. (S.d.). *Why build a guided busway?*.

Disponível em: <https://www.britpave.org.uk/GBWhyBuild.ink>, consultado em: setembro de 2019.

Butler, Katie. (2016). *Leigh guided busway: Passengers take first ride on new service to Manchester*.

Disponível em: <https://www.manchestereveningnews.co.uk/news/greater-manchester-news/leigh-guided-busway-manchester-route-11130436>, consultado em: abril de 2019.

Caraco, Alain. (2004). *Tramway de Caen Station*. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tramway_de_Caen_Station.jpg, consultado em: abril de 2019.

Carris. (2018). *Novos autocarros*. Disponível em: <http://m.carris.pt/pt/noticias/2018/Novos-Autocarros-Fotografias-2018/>, consultado em: agora de 2019.

cegas. (S.d.). *Equivalência energética*. Disponível em: <http://www.cegas.com.br/gas-natural/equivalencia-energetica/>, consultado em: dezembro de 2019.

Chiesa, Luigi. (2009). *Diagram of the Translohr guide rail (green) and the tram's guide wheels (red)*.

Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Rubber-tyred_tram#/media/File:TranslohrGuideRail.svg, consultado em: maio de 2019.

Cognasse, Olivier. (2012). *UN TRAMWAY NOMMÉ DÉSASTRE*. Disponível em:

<https://www.usinenouvelle.com/article/un-tramway-nomme-desastre.N169362>, consultado em: maio de 2019.

Comissão Europeia. (2016). *Viajar para o estrangeiro - Reino Unido*. Disponível em:

http://ec.europa.eu/transport/road_safety/going_abroad/united_kingdom/forbidden_lane_pt.htm, consultado em: outubro de 2019.

Commercial Motor. (1984). *On the right track*. Disponível em:

<http://archive.commercialmotor.com/article/19th-may-1984/22/on-the-right-track>, consultado em: abril de 2019.

Divetis. (S.d.). *315-0002 Separador de carril bus*. Disponível em:

<https://www.divetis.es/productos/topes-calzos-delimitadores/delimitadores/separador-de-carril-bus/>, consultado em: abril de 2019.

Dream Alcalá. (2017). *El Carril BUS Exprés en la A2 podría hacerse realidad muy pronto*. Disponível em: <https://www.dream-alcala.com/carril-bus-expres-la-a2-podria-hacerse-realidad-pronto/>, consultado em: setembro de 2019.

Dunstable Today. (2013). *The £91m Luton-Dunstable Guided Busway is finally open*. Disponível em: <https://www.dunstabletoday.co.uk/news/the-91m-luton-dunstable-guided-busway-is-finally-open-1-5521822>, consultado em: maio de 2019.

Edkins, Keith. (2009). *Cambridgeshire Guided Busway*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Cambridgeshire_Guided_Busway#/media/File:Cambridge_Busway_Stage_coach_Scania_N230_Cropped.jpg, consultado em: abril de 2019.

ELGAS. (2019). *LPG (propane) Gas Unit Conversions: Gas in kg, Litres, MJ, kWh & m³*. Disponível em: <https://www.elgas.com.au/blog/389-lpg-conversions-kg-litres-mj-kwh-and-m3>, consultado em: dezembro de 2019.

Ellis, Josh. (2011). *BRT Case Study: Cleveland, Ohio*. Disponível em: <https://www.metroplanning.org/news/6203/BRT-Case-Study-Cleveland-Ohio>, consultado em: maio de 2019.

elMIRA.es. (2017). *El tranvía de Sevilla se viste de Tío Pepe para la Feria de Abril*. Disponível em: <https://elmira.es/18/04/2017/el-tranvia-de-sevilla-se-viste-de-tio-pepe-para-la-feria-de-abril/>, consultado em: agosto de 2019.

Ernstkers. (2007). *Metro Transportes do Sul - Casa do Povo stop*. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metro_Transportes_do_Sul_-_Casa_do_Povo_stop.jpg, consultado em: março de 2019.

Ferro, Antonio. (2019). *Gás natural no Transmilenio*. Disponível em: <https://www.revistaautobus.com.br/artigo/gas-natural-no-transmilenio>, consultado em: setembro de 2019.

Giga-fren. (2013). *Commercial speed*. Disponível em: <https://glosbe.com/en/en/commercial%20speed>, consultado em: janeiro de 2020.

Gino De Pauli. (2009). *Translorh, la rotaia che uccide*. Disponível em: <http://www.beppegrillo.it/translorh-la-rotaia-che-uccide/>, consultado em: agosto de 2019.

Global BRT Data (a). (S.d.). *Global BRT Data*. Disponível em: <https://brtdata.org/>, consultado em: agosto de 2019.

Global BRT Data (b). (S.d.). *CONSUMO DE COMBUSTÍVEL, ÔNIBUS BIARTICULADO*. Disponível em: https://brtdata.org/indicators/systems/fuel_economy_bi-articulated_buses/?lang=pt, consultado em: novembro de 2019.

Greater Cleveland Regional Transit Authority (RTA). (S.d.). *RTA's HealthLine -- the world-class standard for BRT service.* Disponível em: <http://www.riderta.com/healthline/about>, consultado em: abril de 2019.

Harrison, Matt. (2019). *#AYearOfBuses 66: Superoute 66 Ipswich – Martlesham Heath.* Disponível em: <https://transportdesigned.com/ayearofbuses-66-superoute-66-ipswich-martlesham-heath/>, consultado em: abril de 2019.

Hawlich, Martin. (2006). *Carril bus en la ciudad de Mannheim en Alemania.* Disponível em: https://es.wikipedia.org/wiki/Carril_bus#/media/Archivo:Busspur_und_Haltestelle_in_Mannheim_100_9128.jpg, consultado em: setembro de 2019.

HolyLandPhotos' Blog. (2016). *Special Diolkos Remains Near Corinth.* Disponível em: <https://holylandphotos.wordpress.com/2016/06/23/special-diolkos-remains/>, consultado em: 28 de julho de 2019.

Instituto Nacional de Estatística (INE). (S.d.). *Atualização de Valores com Base no IPC.* Disponível em: <https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ipc>, consultado em: setembro de 2019.

Japan Visitor. (S.d.). *Yutorito Line Nagoya.* Disponível em: <https://www.japanvisitor.com/japan-transport/yutoritoline>, consultado em: maio de 2019.

johnzebedee. (2014). *Coimbra trolleybus No. 75, registration No. 85.IF.86.* Disponível em: <https://timstours.piwigo.com/picture?/4321>, consultado em: junho de 2020.

Jungyun, Kwon. (2012). *Korea's first "aboveground" subway unveiled.* Disponível em: http://www.homestaykorea.com/?document_srl=58652, consultado em: outubro de 2019.

Kaushik. (2015). *Guided Busways.* Disponível em: <https://www.amusingplanet.com/2015/08/guided-busways.html>, consultado em: abril de 2019.

Keall, Y. (2019). *Caen : d'un tramway à l'autre en passant par le TVR.* Disponível em: <http://transporturbain.canalblog.com/pages/caen---d-un-tramway-a-l-autre-en-passant-par-le-tvr/27212347.html>, consultado em: maio de 2019.

Legueltel, Philippe. (2017). *Caen dit adieu à son TVR.* Disponível em: <https://www.paris-normandie.fr/breves/normandie/caen-dit-adieu-a-son-tvr-OK11828723>, consultado em: maio de 2019.

Lorenzi, Livia e Lorenzi, Gabriel. (2018). *Passeio no Elétrico 28 ou no Elétrico Vermelho em Lisboa?.* Disponível em: <https://dicasdelisboa.com.br/2019/01/passeio-no-eletrico-28-ou-no-eletrico-vermelho-em-lisboa.html>, consultado em: março de 2019.

Loury, Jean-Luc. (2017). *Fin du TVR à Caen. Une vie ponctuée de galères.* Disponível em: <https://www.ouest-france.fr/normandie/caen-14000/fin-du-tvr-caen-une-vie-ponctuee-de-galeres-5472489>, consultado em: agosto de 2019.

Luton Council. (S.d.). *Busway benefits*. Disponível em:

https://www.luton.gov.uk/Transport_and_streets/Transport_planning/Luton%20Dunstable%20Busway/Pages/Benefits_2.aspx, consultado em: maio de 2019.

Lynne, Freddie. (2019). *Guided busway safety improved after recent incidents - but is it enough?* .

Disponível em: <https://www.cambridge-news.co.uk/news/cambridge-news/guided-busway-safety-cambridge-kingshedges-16347838>, consultado em: novembro de 2019.

Maller, Yury. (2018). *TRANSLOHR vs. GUIDED LIGHT TRANSIT (GLT)*. Disponível em:

http://ymtram.mashke.org/france/nancy/translohr_glt_en.html, consultado em: agosto de 2019.

Martincar. (S.d.). *¿Sabía quién y donde se inventó el autobús?* Disponível em:

<https://www.autocaresmartincar.com/sabias-quien-y-donde-se-invento-el-autobus/>, consultado em: outubro de 2019.

Mauritsvink. (2006). *Eingelenkiges Fahrzeug*. Disponível em:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Phileas_\(Fahrzeug\)#/media/File:Hermes_1210_Eindhoven_Noord_Brabantlaan_14-07-2006.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Phileas_(Fahrzeug)#/media/File:Hermes_1210_Eindhoven_Noord_Brabantlaan_14-07-2006.JPG), consultado em: setembro de 2019.

Metro Report. (2017). *Keolis awarded Caen operating contract covering bus to tram conversion*.

Disponível em: <https://www.metro-report.com/news/single-view/view/keolis-awarded-caen-operating-contract-covering-bus-to-tram-conversion.html>, consultado em: agosto de 2019.

Milliyet. (2009). *Expensive buses head to the garage*. Disponível em:

<http://www.hurriyet.com.tr/gundem/expensive-buses-head-to-the-garage-11474078>, consultado em: setembro de 2019.

Miranda, Adriano. (2011). *STCP Autocarros de dois pisos estão de volta ao Porto*.

<https://www.publico.pt/2011/02/26/jornal/stcp-autocarros-de-dois-pisos-estao-de-volta-ao-porto-21428532>, consultado em: novembro de 2019.

Moissejev. (2013). *Adelaide-Bahn O Busway*. Disponível em:

<https://pt.depositphotos.com/77193937/stock-photo-adelaide-o-bahn-busway.html>, consultado em: julho de 2019.

New China TV. (2016). *Quick charge! Supercapacitor tram unveiled in China*. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=GX4o-2qFH40>, consultado em: junho de 2019.

Nikola. (2013). *New Generation of Trams*. Disponível em: <https://kojects.com/2013/03/20/new-generation-of-trams/>, consultado em: março de 2013.

NTL. (S.d.). *NTL*. Disponível em: <http://www.newtl.com/en>, consultado em: setembro de 2019.

Pardo, Carlos e Weinstock, Annie. (2018). *The Online BRT Planning Guide: Roadway Configurations*. Disponível em: <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/roadway-and-station-configurations/roadway-configurations>, consultado em: maio de 2019.

Pereira, Valdecy, Costa, Helder Gomes e Nepomuceno, Livia Dias de Oliveira. (2019). *Electre I, I_s, I_v, II, III, IV, TRI and TRI-ME Software*. Disponível em: <https://github.com/Valdecy/J-Electre>, consultado em: janeiro de 2020.

Pierre. (2010). *Les problèmes du TRANSLOHR*. Disponível em: http://www.fnautpaysmaures.com/index.php?option=com_content&view=article&id=216:les-problemes-du-translohr&catid=24:tramways, consultado em: agosto de 2019.

RAC. (S.d.). *Euro 1 to Euro 6 guide – find out your vehicle's emissions standard*. Disponível em: <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>, consultado em: agosto de 2019.

Rail Technology (a). (S.d.). *Rail Technology*. Disponível em: <https://www.railway-technology.com/>, consultado em: setembro de 2019.

Rail Technology (b). (S.d.). *Paris Tramway Line T6*. Disponível em: <https://www.railway-technology.com/projects/paris-line-t6/>, consultado em: setembro de 2019.

Rastogi, Neha. (2017). *China Unwraps World's first Driverless Rail Transit System with Autonomous Technology*. Disponível em: <https://www.engineersgarage.com/blogs/china-unwraps-world-first-driverless-rail-transit-system-autonomous-technology>, consultado em: março de 2019.

Shedd, Thomas Clark e Allen, Geoffrey Freeman. (S.d.). *Diesel Traction*. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/locomotive-vehicle/Diesel-traction>, consultado em: julho de 2019.

Smiler, Simon P (a). (S.d.). *The former Birmingham (UK) Traceline 65*. Disponível em: <http://citytransport.info/Traceline65.htm>, consultado em: maio de 2019.

Smiler, Simon P (b). (S.d.). *New Era Hi-tech Buses*. Disponível em: <http://citytransport.info/Buses03.htm>, consultado em: setembro de 2019.

Smiler, Simon P (c). (S.d.). *Bus Priority Systems*. Disponível em: <http://www.citytransport.info/OBahn.htm>, consultado em: agosto de 2019.

Smiley.toerist. (2013). *Autobus sur la ligne T2 à l'arrêt Théâtre des Arts*. Disponível em: https://fr.wikipedia.org/wiki/Transport_est-ouest_rouennais#/media/File:Rouen_bus_T2_l.jpg, consultado em: junho de 2019.

- Snaevar. (2011).** *Cross section of guide rail and guide wheel*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Bombardier_Guided_Light_Transit#/media/File:TVRGeleiding.svg, consultado em: agosto de 2019.
- STCP. (S.d.).** *Autocarros Dois pisos*. Disponível em: <https://www.stcp.pt/pt/institucional/stcp/frota/autocarros-dois-pisos/>, consultado em: julho de 2019.
- Tbus. (2008).** *Tbus News - 2008*. Disponível em: <http://www.tbus.org.uk/news2008.htm>, consultado em: agosto de 2019.
- thebusway. (S.d.).** *routes & times*. Disponível em: <https://www.thebusway.info/routes-times.shtml>, consultado em: maio de 2019.
- Thompson, Avery. (2017).** *China Built a Self-Driving... Something*. Disponível em: <https://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/a26782/china-built-a-self-driving-something/>, consultado em: setembro de 2019.
- Train History (a). (S.d.).** *History of Rail Transport*. Disponível em: <http://www.trainhistory.net/railway-history/railroad-history/>, consultado em: setembro de 2019.
- Train History (b). (S.d.).** *Tram - History and Different Types of Trams*. Disponível em: <http://www.trainhistory.net/railway-history/tram/>, consultado em: outubro de 2019.
- Via libre. (2013).** *Sube la velocidad comercial de metro y tranvía de Valencia*. Disponível em: <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=10000>, consultado em: janeiro de 2020.
- Volvo Bus. (2018).** *BRT, o metrô de superfície sobre pneus*. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/onibus/brt-o-metro-de-superficie-sobre-pneus/>. Consultado em: agosto de 2019.
- Waard, Peter de. (2014).** *Geavanceerde tram op banden Phileas eindigt toch als flop*. Disponível em: <https://www.volkskrant.nl/economie/geavanceerde-tram-op-banden-phileas-eindigt-toch-als-flop~b7ac7494/?referer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>, consultado em: setembro de 2019.
- Walker, Jarrett. (2015).** *Rua da Constituição*. Disponível em: <https://ruadaconstituicao.blog/2015/05/21/electricos-e-metro-ligeiro-existe-uma-diferenca/>, consultado em: fevereiro de 2020.
- WayBackMachine. (2012).** *Spurbus*. Disponível em: https://web.archive.org/web/20120307205607/http://www.pro-bahn-bw.de/rv_rhein_neckar/rn-spurbus.htm, consultado em: abril de 2020.
- Wikipédia. (S.d.).** *APTS Phileas*. Disponível em: https://fr.wikipedia.org/wiki/APTS_Phileas#cite_note-43, consultado em: setembro de 2019.

WillD. (2007). *Pantograph for Trackless Trolley vs. Light Rail or MU*. Disponível em: <http://www.subchat.com/readflat.asp?id=486490&p=1#486654>, consultado em: junho de 2019.

Willemssen, Diederik. (2019). *Corinth Canal Diolkos*. Disponível em: <https://www.sailingissues.com/corinth-canal-diolkos.html>, consultado em: julho de 2019.

Wong, Yale. (2019). *Debunking the myths around the optically-guided bus (trackless trams)*. Disponível em: <https://sydney.edu.au/business/news-and-events/news/2019/01/21/debunking-the-myths-around-optically-guided-bus--trackless-trams.html>, consultado em: agosto de 2019.

Wong, Yale Zhuxiao. (2018). *Looking past the hype about 'trackless trams'*. Disponível em: <https://theconversation.com/looking-past-the-hype-about-trackless-trams-107092>, consultado em: outubro de 2019.

Wymer, Kenneth. (2010). *West Eugene EmX Extension Enterprise Story*. Disponível em: <https://reporting1blog.wordpress.com/2010/12/07/west-eugene-emx-extension-enterprise-story/>, consultado em: setembro de 2019.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS GUIADOS MECÂNICOS (SGMEC)

Quadro A.1 – Propriedades dos SGMEC

Nome do sistema	Local	Tipo de guiamento	Data de implementação	Data de encerramento (caso exista)	Tempo de percurso [min]	Velocidade comercial [km/h]	Extensão da linha	Custos de construção em M€/km
Healthline	Cleveland, Estados Unidos da América	Mecânico só nas estações	2008 ^[1]	-	28 ^[14]	21,7 ^[20]	11,4km ^[22]	8,72 ^[24]
Yutorito Line	Nagoya, Japão	Mecânico	2001 ^[2]	-	13 ^[15]	30 ^[21]	6,5km guiado ^[23]	26,23 ^[25]
Bangkok BRT	Bangkok, Tailândia	Mecânico só nas estações	2010 ^[3]	-	31,8 ^[A]	30 ^[3]	15,9km ^[3]	4,13 ^[26]
The Busway	Cambridge, Reino Unido	Mecânico	2009 ^[4]	-	Depende do percurso ^[16]	60 ^[11]	40km (25km guiado) ^[4]	8,42 ^[27]
Leigh - Manchester Busway	Manchester, Reino Unido	Mecânico	2016 ^[5]	-	50 ^[17]	27 ^[B]	22,5km (7,2km guiado) ^[11]	6,88 ^[28]
Leeds	Leeds e Bradford, Reino Unido	Mecânico	1995 ^[6]	-	-	-	4,2km guiado ^[6]	-
First Bradford	Bradford, Reino Unido	Mecânico	2002 ^[6]	-	-	-	3,7km (2,3km guiado) ^[6]	-
Fastway	Crawley, Reino Unido	Mecânico	2003 ^[6]	-	-	-	24km (1,5km guiado) ^[6]	-
Superoute 66	Ipswich, Reino Unido	Mecânico	1995 ^[7]	-	-	-	200 metros guiado ^[7]	-
Fastlink	Edinburgh, Reino Unido	Mecânico	2004 ^[6]	-	-	-	1,5km guiado ^[6]	-
Luton-Dunstable Busway	Luton e Bedfordshire, Reino Unido	Mecânico	2013 ^[8]	-	15 ^[18]	39 ^[B]	9,70km guiado ^[18]	7,56 ^[29]
Tracline 65	Birmingham, Reino Unido	Mecânico	1984 ^[9]	1987 ^[13]	-	-	600 metros guiado ^[13]	-

Nome do sistema	Local	Tipo de guiamento	Data de implementação	Data de encerramento (caso exista)	Tempo de percurso [min]	Velocidade comercial [km/h]	Extensão da linha	Custos de construção em M€/km
The Spurbus	Mannheim, Alemanha	Mecânico	1992 ^[10]	2005 ^[10]	-	-	-	-
The Spurbus	Essen, Alemanha	Mecânico	1980 ^[11]	-	88 ^[A]	16,5 ^[11]	24,20km (4km guiado) ^[11]	-
North East Busway	Adelaide, Austrália	Mecânico	1986 ^[12]	-	9 ^[19]	80 ^[19]	12,00km guiado ^[19]	6,16 ^[30]

Fonte¹: [1] – (Office of Planning and Environment; Federal Transit Administration; U.S. Department of Transportation, 2012); [2] – (City of Nagoya, S.d.); [3] – (Kodukula, 2010); [4] – (Menzies, 2011); [5] – (Urban Transport Group, 2018); [6] – (BRT-UK, 2014); [7] – (Harrison, 2019); [8] – (Dunstable Today, 2013); [9] – (Commercial Motor, 1984); [10] – (WayBackMachine, 2012); [11] – (Global BRT Data (a), S.d.); [12] – (TCRP, S.d.); [13] – (Smiler (a), S.d.); [14] – Tempo de percurso varia consoante a hora de partida (Greater Cleveland Regional Transit Authority (RTA), S.d.); [15] – (Hiroyuki, et al., 2006); [16] – (thebusway, S.d.); [17] – (Butler, 2016); [18] – (Luton Council, S.d.); [19] – (Currie, 2006); [20] – Valor transformado de mph para km/h (Ellis, 2011); [21] – (Takeshita, et al., 2009); [22] – Valor convertido de milhas para km (Greater Cleveland Regional Transit Authority (RTA), S.d.); [23] – (Japan Visitor, S.d.); [24] – Valor convertido de \$/milhas para €/km e atualizado do ano 2012 para o ano 2018 (1\$ = 0,91€; 1 milha = 1,61km) (Office of Planning and Environment; Federal Transit Administration; U.S. Department of Transportation, 2012); [25] – Valor convertido de \$/km para €/km e atualizado do ano 2008 para o ano 2018 (Asian Development Bank, 2008); [26] – Valor convertido de Thai Baht para €/km e atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (Kodukula, 2010); [27] – Valor referente à zona guiada, convertido de £ para €/km e atualizado do ano 2011 para o ano 2018 (1£ = 0,91€) (Urban Transport Group, 2018); [28] – Valor convertido de £ para €/km e atualizado do ano 2016 para o ano 2018 (Butler, 2016); [29] – Valor convertido de £ para €/km e atualizado do ano 2002 para o ano 2018 (Nicols, 2009); [30] – Valor convertido de AUD/km (Dólar Australiano) para €/km e atualizado do ano 2006 para o ano 2018 (1AUD = 0,615€) (Currie, 2006);

[A] – Tempo de percurso obtido através da velocidade comercial e da extensão do sistema; [B] Velocidade comercial obtida com base na extensão da linha e no tempo de percurso;

¹ Confrontar **Anexo O** para visualizar a data de conversão monetária.

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS GUIADOS POR CARRIL INTERMÉDIO (SGCI)

Quadro B.1 – Propriedades dos SGCI

Nome do sistema	Local	Tipo de guiamento	Data de implementação	Data de encerramento (caso exista)	Velocidade comercial [km/h]	Extensão da linha [km]	Fonte de energia	Custos de construção em M€/km
TVR de Nancy	Nancy, França	GLT	2001 ^[1]	-	14,5 ^[1]	11 (60% guiado) ^[10]	Elétrico e Diesel ^[3]	16,97 ^[11]
TVR de Caen	Caen, França	GLT	2002 ^[2]	2017 ^[5]	20 ^[1]	14,8 (100% guiado) ^[10]	Elétrico e Diesel ^[3]	19,68 ^[11]
Tramway de Clermont-Ferrand	Clermont-Ferrand, França	Translohr	2006 ^[3]	-	18 ^[6]	14 ^[3]	Elétrico ^[4]	21,97 ^[12]
T5	Paris, França	Translohr	2013 ^[4]	-	18 ^[7]	15 ^[10]	Elétrico ^[4]	27,40 ^[13]
T6			2014 ^[4]	-	20 ^[7]	14 ^[4]	Elétrico ^[4]	30,87 ^[14]
Tramway de Pádua	Pádua, Itália	Translohr	2007 ^[4]	-	-	10,3 ^[4]	Elétrico ^[4]	9,63 ^[15]
T1	Veneza-Mestre, Itália	Translohr	2010 ^[4]	-	21 ^[8]	14 ^[5]	Elétrico ^[4]	11,02 ^[15]
T2					15 ^[8]	6 ^[3]	Elétrico ^[4]	
Ayacucho line	Medellín, Colômbia	Translohr	2016 ^[4]	-	30 ^[9]	4,2 ^[4]	Elétrico ^[4]	23,22 ^[16]
Tramway de Zhangjiang	Shanghai, China	Translohr	2009 ^[4]	-	-	9 ^[4]	Elétrico ^[4]	9,80 ^[15]
TEDA	Tianjin, China	Translohr	2007 ^[4]	-	-	8 ^[4]	Elétrico ^[4]	9,37 ^[15]

Fonte¹: [1] – (Global BRT Data (a), S.d.); [2] – (King, et al., 2015); [3] – (L'Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable (ICEDD), 2008); [4] – (NTL, S.d.); [5] – (Legueltel, 2017); [6] – (An, 2011); [7] – (Rail Technology (a), S.d.); [8] – (Smiler (b), S.d.); [9] – (Estévez, 2016); [10] – (Bourget, et al., 2010); [11] – Valor convertido de \$/km para €/km e atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (1\$ = 0,91€) (Global BRT Data (a), S.d.); [12] – Valor correspondente ao custo de investimento do sistema em Clermont-Ferrand, menos o custo do material circular. Valor atualizado do ano 2011 para o ano 2018 (An, 2011); [13] – Valor atualizado do ano 2008 para o ano 2018 (Rail Technology (a), S.d.); [14] – Valor atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (Rail Technology (b), S.d.); [15] – Valor transformado de € para €/km e atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (Parsons Brinckerhoff, 2010); [16] – Valor transformado de € para €/km e atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (Bnamericas, 2013);

¹ Confrontar **Anexo O** para visualizar a data de conversão monetária.

ANEXO C – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS GUIADOS ÓTICOS (SGO)

Quadro C.1 – Propriedades dos SGO

Nome do sistema	Local	Tipo de guiamento	Data de implementação	Data de encerramento (caso exista)	Velocidade comercial [km/h]	Extensão da linha [km]	Custo de construção [M€/km]
MAX	Las Vegas, Estados Unidos da América	Ótico só nas estações	2004 ^[1]	2016 ^[5]	23,8-29,9 (valor médio de 26,9) ^[6]	12 ^[8]	4,40 ^[9]
T1	Rouen, França	Ótico só nas estações	2002 ^[2]	-	17,5 ^[2]	32,1 ^[2]	8,03 ^[10]
T2			2001 ^[2]	-			
T3			2001 ^[2]	-			
Ligne B	Clermont-Ferrand, França	Ótico só nas estações	2001 ^[3]	2005 ^[3]	-	-	-
T1	Nîmes, França	Ótico só nas estações	2012 ^[2]	-	22,5 ^[7]	4,5 ^[2]	12,65 ^[11]
TRAM	Castellón, Espanha	Ótico: contínuo num troço e junto às estações	2008 ^[4]	-	18,0 ^[7]	10,4 (2km guiado continuamente, os restantes apenas guiado junto às estações) ^[2]	13,94 ^[10]
-	Bolonha, Itália	Ótico só nas estações	-	-	-	-	-
ART	Zhuzhou, China	Ótico contínuo	Em projeto	-	-	-	Estimativa entre 6,37 e 13,65 ^[12]

Fonte¹: [1] – (Federal Transit Administration, 2005); [2] – (Global BRT Data (a), S.d.); [3] – (Guigueno, 2009); [4] – (London Guided Busway, S.d.); [5] – (Wong, 2019); [6] – Intervalo de valores que depende da altura do dia e da direção do percurso. Valor convertido de mph para km/h (Federal Transit Administration, 2005); [7] – (Llombart, 2012); [8] – Valor convertido de milhas para km. (Federal Transit Administration, 2005); [9] – Valor convertido de \$ para €/km e atualizado do ano 2002 para o ano 2018 (1\$ = 0,91€) (Transportation Research Board Of The National Academies, 2002); [10] – Valor convertido de \$/km para €/km e atualizado do ano 2011 para o ano 2018 (Global BRT Data (a), S.d.); [11] – Valor estimado através do custo de investimento menos o custo dos veículos, tendo-se considerado que cada veículo tem um custo aproximado de 1M€, sendo que são 10 veículos. Valor atualizado do ano 2012 para o ano 2018 (Attiach, 2011); [12] – Valores convertidos de \$ para € (1\$=0,91€), relativo ao ano 2018 (Wong, 2018);

¹ Confrontar **Anexo O** para visualizar a data de conversão monetária.

ANEXO D – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS GUIADOS MAGNÉTICOS (SGMAGN)

Quadro D.1 – Propriedades dos SGMagn

Nome do sistema	Local	Data de implementação	Data de encerramento (caso exista)	Velocidade comercial [km/h]	Extensão da linha [km]	Custo de construção em M€
EmX	Eugene, Oregon, Estados Unidos da América	2013 ^[1]	2015 ^[1]	-	2,4 ^[1]	-
Zuidtangent	Eindhoven, Holanda	2004 ^[2]	2016 ^[2]	21 ^[4]	15 ^[4]	-
-	Amesterdão, Holanda	2011 ^[2]	2014 ^[2]	-	-	-
-	Pescara, Itália	-	-	-	-	-
Tram de Douai	Douai, França	2010 ^[2]	2014 ^[2]	24,7 ^[4]	34 ^[4]	4,66 ^[6]
Bimodal Tram	Sejong, Coreia do Sul	2005 ^[2]	-	-	31,2 ^[5]	-
-	Haifa, Israel	2013 ^[2]	-	24,7 ^[4]	40 ^[4]	-
Metrobus	Istambul, Turquia	2007 ^[3]	-	35 ^[4]	52 ^[4]	-
-	Cologne, Alemanha	2011 ^[2]	2016 ^[2]	-	-	-

Fonte¹: [1] – (Gregg, et al., 2016); [2] – (Wikipédia, S.d.); [3] – (Milliyet, 2009); [4] – (Global BRT Data (a), S.d.); [5] – (Jungyun, 2012); [6] – Valor convertido de \$/km para €/km e atualizado do ano 2010 para o ano 2018 (1\$=0,91€) (Global BRT Data (a), S.d.);

¹ Confrontar **Anexo O** para visualizar a data de conversão monetária.

ANEXO E – ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE APRESENTADOS NOS CAPÍTULOS 2 E 3 EM RELAÇÃO AOS VEÍCULOS UTILIZADOS

Quadro E.1 – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação aos veículos utilizados

Características	Autocarro tradicional	Troleibus	Elétrico	SGMec	SGCI - TVR	SGCI - Translohr	SGO - Irisbus	SGO - ART	SGMagn - Phileas
Tipo de energia usada pelos veículos	Diversos	Eletricidade	Eletricidade	Diversos	Híbrido: Eletricidade/ Diesel	Eletricidade	Diversos	Eletricidade	Híbrido: Eletricidade/ GLP
Capacidade média do veículo [4p/m²]	ST – 80 DP - 95 AA – 120 BA- 150	TST – 80 TA – 120	3 CAR – 200 4 CAR – 300	ST – 80 DP - 95 AA – 120	3 CAR – 131	3 CAR – 127 4 CAR – 170 5 CAR – 213 6 CAR – 255	TST – 80 AA – 120	3 CAR – 200	AA – 103 BA – 129 a 141
Custo do material circulante [M€]*	ST – 0,305 DP – 0,420 AA – 0,499 BA – 0,832	TST – 0,665 TA – 1,109	3 CAR – 2,33	ST – 0,309 DP – 0,424 AA – 0,503	3 CAR – 2,02	3 CAR – 2,20 4 CAR – 2,43 5 CAR – 2,87 6 CAR – 6,76	TST – 1,14 AA – 0,52	3 CAR – 2,00	AA – 1,25 BA – 1,53 a 1,84

Fonte: Todos os dados foram recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados;

Legenda: ST – Autocarro standard; DP – Autocarro duplo piso; AA – Autocarro articulado; BA – Autocarro biarticulado; TST – Troleibus standard; TA – Troleibus articulado; CAR – carruagens;

Nota: * – O custo do material circulante é correspondente ao tipo de energia usada pelos veículos. Nos casos em que existem diversos tipos de energia que podem ser utilizados pelos veículos, o custo do material circulante diz respeito a veículos movidos a diesel, à exceção do troleibus no SGO – Irisbus, que é movido a eletricidade.

ANEXO F – ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE APRESENTADOS NOS CAPÍTULOS 2 E 3 EM RELAÇÃO À OPERAÇÃO E À INFRAESTRUTURA

Quadro F.1 – Análise comparativa dos sistemas de transporte apresentados nos Capítulos 2 e 3 em relação à operação e à infraestrutura

Características	Autocarro tradicional	Troleibus	Elétrico	SGMec ^[1]	SGCI - TVR ^[1]	SGCI - Translohr ^[1]	SGO - Irisbus ^[1]	SGO - ART ^[1]	SGMagn - Phileas ^[1]
Sistema de guiamento	Inexistente	Inexistente	Carril	Mecânico	Carril intermédio	Carril intermédio	Ótico	Ótico	Magnético
Dualidade Rodoferroviária	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Velocidade comercial [km/h]^[1]	VB – 11 a 20 VR (BUS) – 15 a 20 VP – 18 a 25			VP – 38	VP – 17,25	VP – 20,33	VP – 21,20	Em projeto	VP – 26,40
Largura de duas vias [m]	6,50 ^[2]	6,50 ^[2]	6,00 ^[2]	6,20	5,40	6,80	6,80	7,66	6,80
Raio de giração [m]	11 ^[2]	11 ^[2]	25 ^[3]	12	10,5	12	12	12	15
Pendente máxima admissível	13% ^[2]	13% ^[2]	6 a 8% ^[2]	13%	13%	13%	13%	13%	13%
Custo de construção [M€/km]^[1]	VB – 1,62 VP – 6,61	VP – 10,18	VP – 17,66	VP – 7,26	VP – 18,33	VP – 17,91	VP – 8,35	VP – 10,01	VP – 4,66

Fonte: [1] – Valores recolhidos dos Capítulos 2 e 3 da presente dissertação. Confrontar estes capítulos para ver a fonte original dos dados. [2] – (Thuret, 2012); [3] – (An, 2011);

Legenda: VB – Via banal; VR – Via reservada; VP – Via própria;

ANEXO G – ANÁLISE ECONÓMICA

Dada à grande extensão da análise económica, apenas serão apresentadas as alterações em relação à análise efetuada por An (2011). Assim, aconselha-se a visualização da análise presente no estudo de An (2011). Desta forma, proceder-se-á à apresentação das alterações de pressupostos em relação à análise do autor em questão.

1) No cálculo do número de trabalhadores, o valor obtido foi sempre arredondado à unidade imediatamente acima.

2) Na estimação do número de trabalhadores para a manutenção do material circulante, foi considerado que os valores da manutenção pontual são todos iguais entre si, equiparados ao sistema de elétrico.

3) Na estimação do número de trabalhadores para a manutenção da via, foi considerada uma percentagem (**Quadro G.1**) em relação ao elétrico. An (2011) considera que, em alguns parâmetros não existe manutenção para alguns sistemas, como por exemplo, no caso do Translohr, define que não existe esmerilagem, nem manutenção das juntas de dilatação. O Translohr exerce menos força no carril, mas o carril é o sistema de guiamento do transporte que também precisa de manutenção.

Quadro G.1 – Quadro resumo com as percentagens atribuídas a cada alternativa, em relação ao sistema de elétrico, para os vários parâmetros da manutenção da via

Parâmetro	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Esmerilamento e polimento	0%	0%	0%	-	0%	50%	50%	0%	0%	0%
Aparelhos de via (dilatação, carriladores, mudanças de via)	0%	0%	0%	-	0%	0%	50%	0%	0%	0%
Mudanças de via	0%	0%	0%	-	0%	0%	50%	0%	0%	0%
Controlo do alinhamento geométrico	0%	0%	0%	-	0%	50%	50%	0%	0%	0%
Limpeza da via não subcontratada	0%	100%	100%	-	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Inspeção e substituição da via	0%	0%	0%	-	0%	50%	50%	0%	0%	0%
Tratamento das juntas	0%	0%	0%	-	0%	50%	100%	0%	0%	0%
Outras intervenções (ancoragens, serragens...)	0%	0%	0%	-	0%	50%	100%	0%	0%	0%

4) Considerou-se que todos os sistemas de transporte têm o mesmo custo de sistemas de apoio à operação, de modo a englobar que todos estes podem ter sistemas de controlo inteligentes.

5) Os valores dos custos de energia unitários foram atualizados através dos valores disponibilizados, via mail, pelos TUB (Transportes Urbanos de Braga). Assim, estes valores são referentes ao ano de 2019 e ao território nacional, que é Portugal (**Quadro G.2**).

Quadro G.2 – Preço dos combustíveis utilizados

Combustível	Custo + IVA	Unidade
Gasóleo	1,24	€/litro
Gás natural	0,640	€/n.m3
Eletricidade	0,160	€/kWh

Fonte: (TUB, 2019)

No **Quadro G.3** estão resumidos os vários valores de consumos de energia por alternativa.

Quadro G.3 – Quadro resumo do consumo de energia por alternativa

Parâmetro	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Consumo de energia – gasóleo (l/km)	0,7 ^[1]	1,12 ^[2]	1,63 ^[1]	-	0,7 ^[1]	1,63 ^[1]	-	0,7 ^[1]	-	-
Consumo de energia – eletricidade (kWh/km)	-	-	4,0 ^[1]	3,3 ^[1]	-	4,2 ^[1]	3,3 ^[1]	-	-	3,3 ^[1]
Consumo de energia – GLP (l/km)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,84 ^[3]	-

Fonte: [1] - (An, 2011); [2] - (Global BRT Data (b), S.d.); [3] - (Phileas; gemeente Eindhoven; Samenwerkingsverband, 2006);

O sistema Phileas (a9) utiliza GLP como tipo de energia, com o seu consumo em l/km, porém, apenas foi facultado, pelos TUB, o preço do gás natural em €/n.m³. Assim, foi necessário recorrer a uma conversão de unidades, apresentada no **Quadro G.4**.

Quadro G.4 – Conversão de unidades de GLP para gás natural

Conversão de GLP para gás natural
1 litro de GLP = 0,51 kg de GLP ^[1]
1 kg de GLP = 1,27 m ³ de gás natural ^[2]

Fonte: [1] - (ELGAS, 2019); [2] - (cegás, S.d.);

6) No que diz respeito à manutenção subcontratada, na parte da limpeza do material circulante, tomou-se como base o elétrico e obtiveram-se os valores referentes aos restantes sistemas de transporte, consoante o comprimento do veículo, ou seja, um veículo com 32 metros tem o mesmo custo de limpeza que o elétrico, que também tem 32 metros.

7) An (2011) não considerou a manutenção das vias rodoviárias. Assim sendo, utilizou-se o custo de manutenção das vias do sistema Irisbus em Rouen, relativo ao ano de 2011 (**Quadro G.5**) (Hedges, et al., 2017), cujo valor foi replicado para os transportes que utilizam a via rodoviária (todos menos o elétrico), à exceção do autocarro em via comum, uma vez que, foi considerado que apenas os sistemas em via própria asseguram a manutenção da via.

Quadro G.5 – Manutenção regular da via rodoviária do sistema Irisbus, em Rouen

Manutenção regular da via rodoviária do sistema Irisbus, em Rouen	
Manutenção do pavimento (€/km_perc)	0,04

Fonte: (Hedges, et al., 2017);

8) Em relação ao sistema TVR, o autor em destaque não contabilizou o custo de manutenção do carril. Desta forma, na presente dissertação será considerado que o custo de manutenção do carril deste sistema é igual ao custo associado ao elétrico e ao Translohr.

9) An (2011) apenas contabilizou os custos de limpeza das vias para o caso dos sistemas de elétrico e Translohr. No entanto, na presente análise foram contabilizados estes custos também para os restantes sistemas, à exceção da alternativa que contempla o autocarro em via, pela justificação mencionada anteriormente. Em relação ao sistema TVR, foi atribuído o mesmo custo que o custo atribuído ao elétrico e ao Translohr por se tratar de um sistema guiado, que também necessita de um tratamento especial para o carril, tal como especifica o autor para o elétrico e para o Translohr. Para os restantes sistemas, foi utilizado o custo de limpeza da via referente ao sistema Irisbus em Rouen, relativo ao ano de 2011 (**Quadro G.6**) (Hedges, et al., 2017).

Quadro G.6 – Custo da limpeza da zona da via principal do sistema Irisbus, em Rouen

Limpeza da zona da via principal	
Limpeza geral da via por quilómetro de via (€/km)	1744,97

Fonte: (Hedges, et al., 2017);

10) An (2011) não considerou os custos relativos à manutenção do guiamento ótico Irisbus. Estes custos foram utilizados do documento de Hedges, et al. (2017) (**Quadro G.7**). Este valor foi também utilizado para o sistema Phileas, como aproximação, visto que, não foi possível encontrar dados referentes à manutenção do guiamento deste sistema.

Quadro G.7 – Custo de manutenção do guiamento ótico e magnético

Manutenção do guiamento ótico e magnético	
Manutenção das marcas rodoviárias por quilómetro de via (€/km)	2281,88
Sistema de leitor das marcas rodoviárias (€/km_perc)	0,01

Fonte: (Hedges, et al., 2017);

11) Em relação aos custos de fardamento dos trabalhadores, o estudo de An (2011) não é explícito em relação às suposições e cálculos efetuados. Deste modo, foi considerado que apenas os condutores e operários necessitam de fardamento obrigatório.

12) Adicionalmente, para o caso da manutenção do guiamento do SGMec, utilizaram-se os valores relativos ao sistema Healthline, em Cleveland, em relação ao ano de 2009 (**Quadro G.8**) (Pessaro, et al., 2011).

Quadro G.8 – Custos de manutenção do guiamento mecânico em Cleveland

Custos de manutenção do SGMec	
Reparações dos braços-guia (€/km_perc)	0,03

Fonte: (Pessaro, et al., 2011);

13) Em relação aos custos de exploração do sistema ART, foi realizada uma estimativa com base no guiamento ótico, já aplicado para o sistema Irisbus, juntamente com o consumo e captação de energia do sistema de elétrico, realçando que o sistema ART tem supercapacitores e não catenária. No entanto, não foi possível estimar o valor de custo de manutenção deste material, assim que, será estimado com base no sistema de catenária por cabos, que é incorporado no elétrico e no troleibus.

Por fim, encontram-se resumidas as estimativas dos custos de exploração segundo o cenário 1 (**Quadro G.9**), o cenário 2 (**Quadro G.10**), o cenário 3 (**Quadro G.11**) e o cenário 4 (**Quadro G.12**).

Quadro G.9 – Discretização dos custos de exploração do cenário 1 (Procura horária de 1000 passageiro por direção)

Parâmetros	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Custos dos trabalhadores (M€)	5,15	3,86	4,61	3,78	4,43	4,32	4,00	4,43	4,14	3,64
Custos do consumo de energia (M€)	1,16	1,46	0,88	0,49	1,16	1,16	0,55	1,16	0,49	0,49
Custos da manutenção subcontratada (M€)	0,54	0,59	0,74	1,19	0,61	1,23	1,28	0,62	0,65	0,77
Outros custos (M€)	0,34	0,30	0,33	0,29	0,33	0,32	0,30	0,33	0,32	0,29
Custo associados à aquisição de novas peças (M€)	0,37	0,29	0,79	1,11	0,43	0,75	1,20	0,43	0,39	0,51
TOTAL (M€)	7,56	6,50	7,35	6,86	6,96	7,78	7,34	6,97	6,00	5,69

Quadro G.10 – Discretização dos custos de exploração do cenário 2 (Procura horária de 2000 passageiro por direção)

Parâmetros	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Custos dos trabalhadores (M€)	8,26	6,05	6,99	5,15	6,81	6,99	5,73	6,81	6,81	5,01
Custos do consumo de energia (M€)	2,22	3,01	1,66	0,87	2,22	2,40	1,07	2,22	0,95	0,87
Custos da manutenção subcontratada (M€)	0,75	0,84	0,94	1,47	0,85	1,69	1,69	0,83	0,94	0,96
Outros custos (M€)	0,46	0,40	0,44	0,35	0,43	0,44	0,38	0,43	0,43	0,35
Custo associados à aquisição de novas peças (M€)	0,73	0,63	1,28	1,63	0,85	1,28	1,88	0,85	0,85	1,03
TOTAL (M€)	12,42	10,93	11,30	9,48	11,17	12,80	10,75	11,15	9,99	8,22

Quadro G.11 – Discretização dos custos de exploração do cenário 3 (Procura horária de 3000 passageiro por direção)

Parâmetros	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Custos dos trabalhadores (M€)	11,46	7,76	9,30	7,06	9,12	9,30	7,97	9,12	9,12	6,92
Custos do consumo de energia (M€)	3,29	4,18	2,44	1,39	3,29	3,55	1,65	3,29	1,37	1,39
Custos da manutenção subcontratada (M€)	0,95	1,02	1,14	1,88	1,09	2,11	2,18	1,04	1,21	1,24
Outros custos (M€)	0,59	0,48	0,54	0,44	0,54	0,54	0,48	0,54	0,54	0,44
Custo associados à aquisição de novas peças (M€)	1,10	0,88	1,77	2,31	1,28	1,77	2,65	1,28	1,28	1,71
TOTAL (M€)	17,38	14,31	15,20	13,07	15,32	17,27	14,93	15,27	13,53	11,69

Quadro G.12 – Discretização dos custos de exploração do cenário 4 (Procura horária de 4000 passageiro por direção)

Parâmetros	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
Custos dos trabalhadores (M€)	14,54	11,57	11,75	8,01	11,57	11,75	9,34	11,57	11,57	7,86
Custos do consumo de energia (M€)	4,35	6,90	3,22	1,65	4,35	4,70	2,03	4,35	1,80	1,65
Custos da manutenção subcontratada (M€)	1,15	1,46	1,34	2,06	1,33	2,54	2,50	1,25	1,48	1,36
Outros custos (M€)	0,70	0,65	0,65	0,48	0,65	0,65	0,54	0,65	0,65	0,48
Custo associados à aquisição de novas peças (M€)	1,47	1,47	2,25	2,65	1,71	2,25	3,16	1,71	1,71	2,05
TOTAL (M€)	22,20	22,04	19,22	14,85	19,60	21,90	17,58	19,53	17,20	13,40

ANEXO H – CÁLCULO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA ANUALMENTE POR CADA SISTEMA

A equação [H.1] traduz a fórmula para obter o número total de km percorridos anualmente (km_perc).

$$km_perc = \sum_{i=1}^4 (N^{\circ}circ_{HDi} \times E \times 2 \times n^{\circ}horas_i \times n^{\circ}dias_i) \quad [H.1]$$

Onde:

- i diz respeito ao período de circulação do veículo. Existem os seguintes 4 distintos períodos de circulação do veículo: dias de semana em hora de ponta ($i = 1$), dias de semana fora da hora de ponta ($i = 2$), sábados ($i = 3$), e domingos e feriados ($i = 4$);
- $N^{\circ}circ_{HDi}$ corresponde ao número de circulações por hora e por direção, referente ao período i ;
- E corresponde à extensão da via num sentido;
- $n^{\circ}horas_i$ corresponde ao número de horas de funcionamento do sistema num dia, referente ao período i ;
- $n^{\circ}dias_i$ corresponde ao número de dias de funcionamento do sistema num ano, referente ao período i ;

No **Quadro H.1** encontram-se expostos os quilómetros percorridos por cada sistema de transporte, em relação aos 4 cenários.

Quadro H.1 – Quilómetros percorridos anualmente por sistema de transporte, consoante o cenário em questão

Alternativas	Cenário 1 (km_perc)	Cenário 2 (km_perc)	Cenário 3 (km_perc)	Cenário 4 (km_perc)
a1	1221000	2442000	3663000	4884000
a2	976800	2093143	2930400	4884000
a3	1221000	2442000	3663000	4884000
a4	732600	1465200	2442000	2930400
a5	1221000	2442000	3663000	4884000
a6	1127077	2442000	3663000	4884000
a7	861882	1831500	2930400	3663000
a8	1221000	2442000	3663000	4884000
a9	1127077	2442000	3663000	4884000
a10	732600	1465200	2442000	2930400

ANEXO I – RESUMO DOS DADOS A SUBMETER PARA ANÁLISE EM RELAÇÃO AO CENÁRIO 1 (1000 PASSAGEIROS/HORA/DIREÇÃO)

Quadro I.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 1

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13
Escala de unidades/ Alternativas	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 9 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 5 ^[1]	M€ ^[2]	M€/km ^[2]	M€/ano ^[2]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	dB ^[2]
a1	0,00	1,00	9,00	1,00	0,00	5,00	-12,48	-1,62	-7,56	1,00	2,00	4,00	-68,00
a2	0,00	0,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-13,31	-6,61	-6,50	2,00	3,00	4,00	-68,00
a3	0,00	1,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-22,18	-10,18	-7,35	2,00	5,00	4,00	-60,00
a4	1,00	0,00	9,00	0,00	1,00	5,00	-27,96	-17,66	-6,86	5,00	5,00	2,50	-60,00
a5	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	3,00	-10,06	-7,26	-6,96	3,00	2,00	4,00	-68,00
a6	1,00	0,00	5,00	1,00	1,00	2,00	-36,36	-18,33	-7,78	4,00	5,00	5,00	-60,00
a7	1,00	0,00	8,00	0,00	1,00	4,00	-34,02	-17,91	-7,34	5,00	5,00	3,50	-60,00
a8	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-10,40	-8,35	-6,97	3,00	2,00	3,50	-68,00
a9	1,00	0,00	5,00	1,00	1,00	4,00	-27,54	-4,66	-6,00	3,00	4,00	3,50	-64,00
a10	1,00	0,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-24,00	-10,01	-	4,00	5,00	2,50	-60,00
Q	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	3,64	1,83	0,78	1,00	1,00	1,00	6,80
P	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	7,27	3,67	2,33	2,00	2,00	2,00	13,60
V	2,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	36,36	18,33	3,89	5,00	5,00	5,00	34,00
W _{REF}	25	30	30	20	20	25	25	25	50	5	15	15	15
W _I	30	40	40	20	20	30	20	20	40	10	10	10	10
W _{II}	20	25	25	15	15	20	35	35	70	10	10	10	10
W _{III}	15	25	25	15	10	20	20	20	40	20	30	30	30

Obs.: [1] – Escala de valores com unidades adimensionais; [2] – Escala de valores com unidades reais;

ANEXO J – RESUMO DOS DADOS A SUBMETER PARA ANÁLISE EM RELAÇÃO AO CENÁRIO 2 (2000 PASSAGEIROS/HORA/DIREÇÃO)

Quadro J.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 2

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13
Escala de unidades/ Alternativas	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 9 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 5 ^[1]	M€ ^[2]	M€/km ^[2]	M€/ano ^[2]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	dB ^[2]
a1	0,00	0,00	9,00	1,00	0,00	5,00	-24,95	-1,62	-12,42	1,00	2,00	4,00	-68,00
a2	0,00	1,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-27,46	-6,61	-10,93	2,00	3,00	4,00	-68,00
a3	0,00	1,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-43,25	-10,18	-11,30	2,00	5,00	4,00	-60,00
a4	1,00	1,00	9,00	0,00	1,00	5,00	-53,59	-17,66	-9,48	5,00	5,00	2,50	-60,00
a5	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	3,00	-19,62	-7,26	-11,17	3,00	2,00	4,00	-68,00
a6	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	2,00	-78,78	-18,33	-12,80	4,00	5,00	5,00	-60,00
a7	1,00	1,00	8,00	0,00	1,00	4,00	-70,47	-17,91	-10,75	5,00	5,00	3,50	-60,00
a8	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-20,28	-8,35	-11,15	3,00	2,00	3,50	-68,00
a9	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	4,00	-59,67	-4,66	-9,99	3,00	4,00	3,50	-64,00
a10	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-46,00	-10,01	-	4,00	5,00	2,50	-60,00
Q	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	7,88	1,83	1,28	1,00	1,00	1,00	6,80
P	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	15,76	3,67	3,84	2,00	2,00	2,00	13,60
V	2,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	78,78	18,33	6,40	5,00	5,00	5,00	34,00
W_{REF}	25	30	30	20	20	25	25	25	50	5	15	15	15
W_I	30	40	40	20	20	30	20	20	40	10	10	10	10
W_{II}	20	25	25	15	15	20	35	35	70	10	10	10	10
W_{III}	15	25	25	15	10	20	20	20	40	20	30	30	30

Obs.: [1] – Escala de valores com unidades adimensionais; [2] – Escala de valores com unidades reais;

ANEXO K – RESUMO DOS DADOS A SUBMETER PARA ANÁLISE EM RELAÇÃO AO CENÁRIO 3 (3000 PASSAGEIROS/HORA/DIREÇÃO)

Quadro K.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 3

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13
Escala de unidades/ Alternativas	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 9 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 5 ^[1]	M€ ^[2]	M€/km ^[2]	M€/ano ^[2]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	dB ^[2]
a1	0,00	0,00	9,00	1,00	0,00	5,00	-37,43	-1,62	-17,38	1,00	2,00	4,00	-68,00
a2	0,00	1,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-38,27	-6,61	-14,31	2,00	3,00	4,00	-68,00
a3	0,00	1,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-64,32	-10,18	-15,20	2,00	5,00	4,00	-60,00
a4	1,00	1,00	9,00	0,00	1,00	5,00	-90,87	-17,66	-13,07	5,00	5,00	2,50	-60,00
a5	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	3,00	-29,17	-7,26	-15,32	3,00	2,00	4,00	-68,00
a6	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	2,00	-117,16	-18,33	-17,27	4,00	5,00	5,00	-60,00
a7	1,00	1,00	8,00	0,00	1,00	4,00	-111,78	-17,91	-14,93	5,00	5,00	3,50	-60,00
a8	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-30,16	-8,35	-15,27	3,00	2,00	3,50	-68,00
a9	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00	4,00	-88,74	-4,66	-13,53	3,00	4,00	3,50	-64,00
a10	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-78,00	-10,01	-	4,00	5,00	2,50	-60,00
Q	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	11,72	1,83	1,74	1,00	1,00	1,00	6,80
P	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	23,43	3,67	5,21	2,00	2,00	2,00	13,60
V	2,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	117,16	18,33	8,69	5,00	5,00	5,00	34,00
W _{REF}	25	30	30	20	20	25	25	25	50	5	15	15	15
W _I	30	40	40	20	20	30	20	20	40	10	10	10	10
W _{II}	20	25	25	15	15	20	35	35	70	10	10	10	10
W _{III}	15	25	25	15	10	20	20	20	40	20	30	30	30

Obs.: [1] – Escala de valores com unidades adimensionais; [2] – Escala de valores com unidades reais;

ANEXO L – RESUMO DOS DADOS A SUBMETER PARA ANÁLISE EM RELAÇÃO AO CENÁRIO 4 (4000 PASSAGEIROS/HORA/DIREÇÃO)

Quadro L.1 – Resumo dos dados a submeter no método ELECTRE, para o cenário 4

	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11	g12	g13
Escala de unidades/ Alternativas	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 9 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	0 ou 1 ^[1]	1 a 5 ^[1]	M€ ^[2]	M€/km ^[2]	M€/ano ^[2]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	1 a 5 ^[1]	dB ^[2]
a1	0,00	0,00	9,00	1,00	0,00	5,00	-49,90	-1,62	-22,20	1,00	2,00	4,00	-68,00
a2	0,00	0,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-64,06	-6,61	-22,04	2,00	3,00	4,00	-68,00
a3	0,00	0,00	9,00	1,00	1,00	5,00	-85,39	-10,18	-19,22	2,00	5,00	4,00	-60,00
a4	1,00	1,00	9,00	0,00	1,00	5,00	-107,18	-17,66	-14,85	5,00	5,00	2,50	-60,00
a5	1,00	0,00	8,00	1,00	1,00	3,00	-38,73	-7,26	-19,60	3,00	2,00	4,00	-68,00
a6	1,00	0,00	5,00	1,00	1,00	2,00	-155,54	-18,33	-21,90	4,00	5,00	5,00	-60,00
a7	1,00	1,00	8,00	0,00	1,00	4,00	-140,94	-17,91	-17,58	5,00	5,00	3,50	-60,00
a8	1,00	0,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-40,04	-8,35	-19,53	3,00	2,00	3,50	-68,00
a9	1,00	0,00	5,00	1,00	1,00	4,00	-117,81	-4,66	-17,20	3,00	4,00	3,50	-64,00
a10	1,00	1,00	8,00	1,00	1,00	4,00	-92,00	-10,01	-	4,00	5,00	2,50	-60,00
Q	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	15,55	1,83	2,22	1,00	1,00	1,00	6,80
P	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	31,11	3,67	6,66	2,00	2,00	2,00	13,60
V	2,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	155,54	18,33	11,10	5,00	5,00	5,00	34,00
W _{REF}	25	30	30	20	20	25	25	25	50	5	15	15	15
W _I	30	40	40	20	20	30	20	20	40	10	10	10	10
W _{II}	20	25	25	15	15	20	35	35	70	10	10	10	10
W _{III}	15	25	25	15	10	20	20	20	40	20	30	30	30

Obs.: [1] – Escala de valores com unidades adimensionais; [2] – Escala de valores com unidades reais;

ANEXO M – MATRIZES DE CREDIBILIDADE OBTIDAS PELO MÉTODO ELECTRE IV

Quadro M.1 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 1¹

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,60			0,40			0,40	
a2		-	0,60		0,40	0,60		0,40	0,60
a3			-			0,60			
a4				-			1,00		
a5		0,60			-			1,00	0,60
a6						-			
a7				0,40		0,60	-		
a8		0,60			0,60			-	
a9						0,80			-

Quadro M.2 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 2¹

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,40			0,40			0,40	0,40
a2		-	0,60		0,80	0,60		0,40	0,60
a3			-			0,60			
a4				-			1,00		
a5		0,60			-			1,00	0,60
a6						-			
a7						0,80	-		
a8		0,60			0,60			-	
a9						0,80			-

Quadro M.3 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 3¹

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,40			0,40			0,40	0,40
a2		-	0,60		0,80	0,60		0,40	0,60
a3			-			0,60			
a4				-			1,00		
a5		0,60			-			1,00	0,40
a6						-			
a7				0,40		0,80	-		
a8		0,60			0,60			-	
a9						0,80			-

Quadro M.4 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE IV, para o cenário 4¹

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,60			0,40			0,40	0,40
a2		-	0,40		0,40	0,60		0,40	0,40
a3		0,80	-			0,60			
a4				-			1,00		
a5		0,80			-			0,80	0,40
a6						-			
a7						0,80	-		
a8		0,60			0,60			-	
a9						0,80			-

¹ Células em branco indicam que o valor de credibilidade correspondente é igual a zero.

ANEXO N – MATRIZES DE CREDIBILIDADE OBTIDAS PELO MÉTODO ELECTRE III

Quadro N.1 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 1 e grupo de pesos W_i^1

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,91	0,89	0,76	0,80	0,76	0,76	0,80	0,70
a2		-		0,83		0,83	0,83		0,90
a3	0,87	0,86	-	0,87	0,79	0,87	0,87	0,83	0,78
a4		0,78		-		0,90	1,00		0,86
a5	0,83	0,90	0,86	0,83	-	0,96	0,93	1,00	0,92
a6		0,48		0,69		-	0,77		0,67
a7		0,79		0,96		0,92	-		0,77
a8	0,93	1,00	0,96	0,93	1,00	0,94	0,93	-	0,88
a9		0,80		0,83		0,98	0,83		-

Quadro N.2 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 2 e grupo de pesos W_i^1

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-								
a2	0,93	-	0,96	0,82	0,90	0,83	0,83	0,90	0,90
a3	0,87	0,87	-	0,84	0,79	0,87	0,87	0,83	0,83
a4	0,56	0,78	0,83	-	0,78	0,90	1,00	0,80	0,87
a5	0,83	0,90	0,86	0,81	-	0,96	0,93	1,00	0,94
a6	0,17	0,51	0,55	0,49	0,72	-	0,72	0,51	0,69
a7	0,56	0,80	0,80	0,93	0,80	0,92	-	0,80	0,84
a8	0,93	1,00	0,96	0,91	1,00	0,94	0,93	-	0,90
a9	0,76	0,80	0,80	0,83	0,80	0,98	0,83	0,80	-

Quadro N.3 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 3 e grupo de pesos W_i^1

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-								
a2	0,93	-	0,96	0,83	0,90	0,83	0,83	0,90	0,90
a3	0,87	0,87	-	0,85	0,79	0,87	0,87	0,83	0,83
a4	0,56	0,78	0,78	-	0,78	0,90	1,00	0,80	0,87
a5	0,83	0,90	0,86	0,81	-	0,96	0,93	1,00	0,94
a6	0,17	0,47	0,55	0,51	0,73	-	0,74	0,53	0,69
a7	0,56	0,80	0,80	0,94	0,80	0,92	-	0,80	0,80
a8	0,93	1,00	0,96	0,91	1,00	0,94	0,93	-	0,90
a9	0,76	0,80	0,80	0,83	0,80	0,98	0,83	0,80	-

Quadro N.4 – Matriz de credibilidade segundo o método ELECTRE III, para o cenário 4 e grupo de pesos W_i^1

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
a1	-	0,93	0,87		0,79	0,76		0,79	0,68
a2	0,93	-	0,94		0,85	0,83		0,86	0,82
a3	0,87	0,91	-		0,79	0,87		0,83	0,83
a4	0,56	0,78	0,82	-	0,78	0,90	1,00	0,80	0,87
a5	0,83	0,90	0,86		-	0,96		1,00	0,93
a6	0,17	0,58	0,54		0,73	-		0,55	0,69
a7	0,56	0,80	0,80	0,92	0,80	0,92	-	0,80	0,83
a8	0,93	1,00	0,96		1,00	0,94		-	0,90
a9	0,76	0,80	0,80		0,80	0,98		0,80	-

¹ Células em branco indicam que o valor de credibilidade correspondente é igual a zero.

ANEXO O – CONVERSÃO MONETÁRIA

Quadro O.1 – Conversão monetária e respetiva data de conversão

Conversão monetária	Data de conversão
1\$ = 0,91€	2/09/2019
1€ = 0,91£	18/09/2019
1AUD = 0,615€	19/09/2019
1 Thai Baht = 0,030€	03/10/2019