

Grupo de Trabalho “Transportes Públicos da Área Metropolitana de Lisboa Sul em corredor próprio”

ANEXO I

Sistemas de transporte público rodoviário de passageiros

Índice

1	Introdução	1
2	Sistemas de transporte público rodoviário	6
2.1	Generalidades.....	6
2.2	Aspetos relacionados com os veículos.....	7
2.2.1	Nota introdutória	7
2.2.2	Dimensões e pesos máximos dos autocarros	8
2.2.3	Sistema de propulsão	9
2.2.4	Carroçaria	17
2.2.5	Guiamento	19
2.2.6	Requisitos de largura de via e de faixa de rodagem	27
2.3	Aspetos relacionados com a infraestrutura	29
2.3.1	Preâmbulo.....	29
2.3.2	Tipologia dos corredores	30
2.3.3	Plena via	30
2.3.4	Intersecções.....	44
2.3.5	Paragens.....	50
	Referências bibliográficas	56

Nota Prévia:

O presente documento é baseado em relatórios elaborados no Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança do Departamento de Transportes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pelos investigadores João Lourenço Cardoso, Carlos Roque e Sandra Vieira Gomes.

Índice de figuras

Figura 1 – Exemplo da relação entre impactes de vários critérios de qualidade na procura de TP ferroviário no RU (adaptado de Anderson <i>et al.</i> , 2013)	3
Figura 2 – Capacidades (passageiros) de ligações entre paragens para regimes de segurança correntes (Vuchic, 2007)	4
Figura 3 – Relações entre a) capacidade da linha e velocidade comercial e entre b) capacidade produtiva e investimento de vários modos de TP (Vuchic, 2007)	5
Figura 4 – Relação entre energia específica e potência específica nas baterias mais comuns no mercado, com indicação de tempos de descarga Ghoniem (2011)	12
Figura 5 – Autocarro elétrico com carregamento de baterias mediante linha aérea de trólei ou de elétrico.....	15
Figura 6 – Relações entre categoria ótima dos autocarros, procura de transporte, frequência de serviço e custos de operação (Vuchic, 2007).....	19
Figura 7 – Autocarro com guiamento mecânico (http://citytransport.info)	20
Figura 8 – BRT de Adelaide: zona de entrada e saída no canal guiado (Philips, 2006)	20
Figura 9 – Autocarro guiado do BRT de Manchester (TfGM, 2015)	21
Figura 10 – Componentes e diagrama funcional de um sistema de apoio ao guiamento em via. (Adaptado de Tan <i>et al.</i> , 2009)	22
Figura 11 – Esquema de um dos testes de estacionamento em paragem (Tan <i>et al.</i> , 2009).....	24
Figura 12 – Sistema Cavis, com orientação ótica, em Rouen (Systra, 2016).....	25
Figura 13 – Características geométricas da carroçaria de um autocarro com impacto na manobrabilidade	27
Figura 14 – Características geométricas de giração de um autocarro para vários tipos de manobra – zona de varredura (Macedo <i>et al.</i> , 2010)	28
Figura 15 – Número de passageiros transportados e percentagem de corredores dedicados (COST TU0603, 2011).....	31
Figura 16 – Variação do número de passageiros transportados e percentagem do corredor dedicado (COST TU0603, 2011)	32
Figura 17 – Configuração típica de corredor BRT (Wright e Hook, 2007)	33
Figura 18 – Corredores BRT em Rouen (Wright e Hook, 2007)	34
Figura 19 – Efeito da distribuição transversal da passagem dos rodados dos veículos pesados na transmissão das cargas ao pavimento: a) com dispersão transversal; b) sem dispersão transversal (Fonte: Domingos, 2016).....	39
Figura 20 – Lancil de proteção do corredor em Bogotá (Wright e Hook, 2007)	40
Figura 21 – Ilhéu separador em Curitiba (Wright e Hook, 2007)	41
Figura 22 – Via Bus no Campo Grande, Lisboa.....	42
Figura 23 – Esquema de sinalização adotado nas intersecções do corredor de BRT de Kesennuma-Tome (Nagai, 2015)	43
Figura 24 – Sinalização vertical em: (a) Twente; (b) Teor; (c) Kent (COST TU0603, 2011) .	43
Figura 25 – Pintura dos corredores: (a) Nagoya; (b) Rouen (Wright and Hook, 2007, COST TU0603, 2011)	44
Figura 26 – Rotunda em Lorient (COST TU0603, 2011)	45
Figura 27 – Estação Nau Vitória, Porto (http://www.openhouseporto.com/places/estacao-de-metro-nau-vitoria/ , acedido em 30.12.2016).....	46
Figura 28 – Sinalização semafórica específica para autocarros e elétricos (COST TU0603, 2011)	47
Figura 29 – Sistema de geometria da intersecção e de semaforização designado “bus gate” (Vuchic, 2007).....	48
Figura 30 – Zona central de Zurique (COST TU0603, 2011).....	49
Figura 31 – Estação do Campo Grande, em Lisboa.....	50

Figura 32 – Distância entre paragens e velocidade de circulação (COST TU0603, 2011) ...	51
Figura 33 – Distância média entre paragens (2006) (Hensher e Golob, 2008)	52
Figura 34 – Plataforma central no corredor Ecovia em Quito (Wright e Hook, 2007).....	53
Figura 35 – Escalonamento das paragens por sentido (Wright e Hook, 2007)	54



Índice de quadros

Quadro 1 – Modos de transporte público. Características gerais de modos selecionados (Adaptado de Seabra <i>et al.</i> , 2011 e Vuchic, 2007)	1
Quadro 2 – Regimes de segurança na operação de TP (Vuchic, 2007)	4
Quadro 3 – Dimensões geométricas máximas legais dos veículos automóveis pesados de passageiros .	8
Quadro 4 – Evolução dos valores limites de emissões preconizados na norma europeia aplicável a motores a gasóleo para veículos pesados (Fontes: Diretiva 2005/55/CE e https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php)	10
Quadro 5 – Comparação entre vários tipos de motorização de autocarros urbanos (Vuchic, 2007)	17
Quadro 6 – Categorias de carroçarias de autocarros	18
Quadro 7 – Largura (m) de faixa de rodagem para autocarros (ASVV, 1998)	28
Quadro 8 – Sobrelargura de via para autocarros (ASVV, 1998)	28
Quadro 9 – Desobstruções para vias de autocarros em linha reta (ASVV, 1998).....	29
Quadro 10 – Aspectos afetados pela implantação de vias dedicadas (COST TU0603, 2011)	30
Quadro 11 – Largura para vias BRT em função do limite de velocidade (COST TU0603, 2011)	34

1 Introdução

Os sistemas de transporte público podem ser classificados mediante três características básicas: a classe de direito de passagem – *ROW-Right of Way* – no corredor; a tecnologia do sistema; e o tipo de serviço (Vuchic, 2007).

Estas características básicas dos modos de transporte correspondem a atributos bastante diferenciados, designadamente no que diz respeito a indicadores da produção de transporte como o volume de passageiros suscetível de ser transportado num período arbitrário de tempo, a frequência máxima de passagem de veículos, a velocidade comercial e a regularidade de serviço expectável em condições correntes. No Quadro 1 apresentam-se as gamas de valores correntes para vários modos de transporte público, rodoviário e ferroviário, mencionados em documento do Instituto de Mobilidade e dos Transportes (IMT).

Quadro 1 – Modos de transporte público. Características gerais de modos selecionados (Adaptado de Seabra et al., 2011 e Vuchic, 2007)

Tipo de corredor	ROW	Tecnologia	Intervalo de passagem em período de ponta (minutos)	Capacidade (pass/h)	Velocidade (km/h)		Regularidade
					Máxima	Comercial	
Banal	C	Autocarro	4 a 10	150 a 1200	30 a 50	11 a 20	Muito baixa
	C	Elétrico	4 a 10	150 a 1200	30 a 50	11 a 20	Muito baixa
Via Bus ou reservada	C / B	Autocarro	3 a 10	500 a 2000	30 a 50	15 a 20	Moderada
	C / B	Elétrico	3 a 10	500 a 2000	30 a 50	15 a 20	Moderada
Sítio próprio (dedicado)	A / B	Autocarro/BRT	2 a 6	1000 a 7000	70	18 a 25	Elevada
	A / B	LRT	2 a 6	1000 a 7000	70	18 a 25	Elevada
	A	Metro	1 a 3	12000 a 32000	90	25 a 35	Muito elevada

Geralmente são consideradas três classes de **direito de passagem** num corredor de transporte (*Right-of-way* – **ROW**), de acordo com o seu grau de separação e proteção relativamente aos outros veículos (Vuchic, 2007):

- **Classe A:** corresponde a corredores com acessos totalmente controlados, sem passagens de nível nem qualquer acesso legal por outros veículos ou pessoas. Estes corredores exclusivos podem ser de nível, em túnel ou em obras-de-arte. Excepcionalmente (geralmente nos sistemas ferroviários regionais ou suburbanos), o corredor pode ter passagens de nível bastante espaçadas, semaforizadas e com cancelas de proteção e ainda assim ser considerado como classe A, uma vez que tais cruzamentos não têm praticamente nenhum efeito no desempenho das linhas.
- **Classe B:** inclui os corredores que são desnivelados ou fisicamente separados dos restantes veículos por lancis, barreiras, ou outros equipamentos com função similar, mas que incluem passagens de nível para veículos e peões, incluindo cruzamentos de nível urbanos. Esta classe

é frequentemente utilizada para sistemas de transporte ferroviário ligeiro (LRT) ou autocarros rápidos (BRT). As vias e faixas de rodagem reservadas a veículos de elevada ocupação (*High occupancy vehicle lanes*) correspondem a um corredor de classe B de baixa qualidade, uma vez que apenas fornecem condições de circulação ligeiramente melhores do que as vias convencionais mas não separam o transporte público (TP) dos veículos particulares. Esta separação é o elemento mais importante para favorecer o TP, com base no serviço público que presta e na sua maior eficiência, face ao transporte individual.

- **Classe C:** corresponde às ruas com tráfego misto. O transporte público poderá circular partilhando o espaço com os restantes veículos ou ter um tratamento preferencial, como no caso dos corredores reservados separados por marcação rodoviária ou sinalização específica (corredores BUS).

As características empregues na avaliação de alternativas para um sistema de transportes podem ser estruturadas em quatro grandes categorias (Vuchic, 2007):

- **Desempenho:** incluindo aspetos como a frequência de serviço, a velocidade de operação, a pontualidade, a segurança, a capacidade da linha, a capacidade produtiva, a produtividade e a utilização.
- **Nível de serviço:** correspondendo à qualidade percebida pelos utentes, englobando indicadores de satisfação (qualidade desejada vs. percebida) e de desempenho (qualidade pretendida vs. prestada).
- **Impactes:** consistindo nas consequências que o sistema tem na área servida, as quais podem ser produzidas a curto prazo (ex., congestionamento, emissões aéreas) ou a longo prazo (ex. atividade económica, valor e usos do solo);
- **Custos:** compreendendo os custos de investimento, necessários para construir e equipar o sistema, e os custos de operação, suportados com o funcionamento regular do mesmo.

No Reino Unido verificou-se ser possível usar as metodologias de estimativa previsional da procura para analisar quais os critérios determinantes da qualidade de serviço mais relevantes na variação da procura de TP, tendo essa análise sido feita de forma continuada ao longo de várias décadas, recorrendo-se para o efeito aos resultados de estudos de preferências declarada e revelada dos passageiros, bem como à aplicação de modelos econométricos e de outras ferramentas de análise quantitativa e qualitativa da influência de várias características do serviço de TP de passageiros na respetiva procura registada (Anderson *et al.*, 2013,).

As análises ao serviço de TP ferroviário de passageiros no Reino Unido permitiram constatar que os passageiros são muito sensíveis ao grau de aglomeração nas carruagens e cais (densidade de passageiros e disponibilidade de lugares sentados), a variações na frequência dos comboios e no tempo de viagem; sensíveis à confiabilidade do serviço e às tarifas; e bastante pouco sensíveis a variações na disponibilidade de informação e no conforto e limpeza (tomando com base o mínimo socialmente aceitável). É de salientar ter-se verificado haver critérios de qualidade relativos à oferta de serviço cuja variação tem maior impacte na escolha dos utentes do que variações equivalentes no valor das tarifas a pagar (Figura 1).

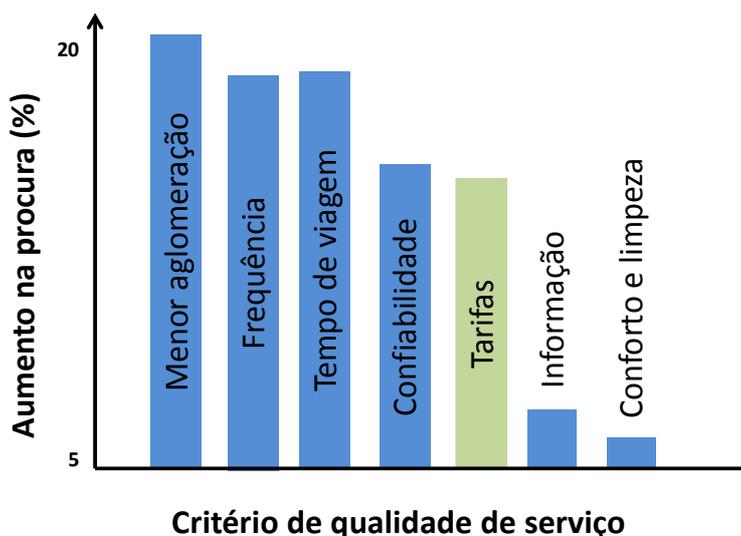


Figura 1 – Exemplo da relação entre impactes de vários critérios de qualidade na procura de TP ferroviário no RU (adaptado de Anderson *et al.*, 2013)

A noção de “**capacidade da linha**” é importante para avaliar o grau de satisfação global da procura de transporte (comparando-a com o valor da procura nos períodos mais carregados). A capacidade de uma linha depende fundamentalmente da capacidade das ligações entre as paragens (estações) e da capacidade das paragens propriamente ditas. A capacidade das ligações está diretamente relacionada com o tempo de espaçamento entre veículos (que depende da distância mínima entre veículos, a qual está subordinada a critérios de segurança), com o número máximo de unidades de transporte (carruagens) por veículo e com a lotação de cada uma das unidades de transporte do veículo (Vuchic, 2007). Habitualmente, a capacidade das paragens é inferior à das ligações, excetuando-se os casos em que numa paragem podem parar vários veículos. Tal ocorre porque os tempos de espaçamento entre veículos numa paragem dependem não só das características dinâmicas, do regime de operação e dos requisitos de segurança específicos dos veículos, mas também do tempo de espera, para abrir as portas, entrada e saída dos passageiros, fecho das portas e reinício da marcha. Verifica-se, assim, que diferenças no contexto de cada carreira podem fazer variar consideravelmente a capacidade da linha em que o trajeto é feito.

Na Figura 2 apresentam -se valores genéricos de capacidade de ligações entre paragens para vários modos de TP, para os respetivos regimes normais de segurança, conforme indicado por Vuchic (2007)¹. Esta figura refere-se ao número máximo de passageiros transportados na ligação por unidade de tempo, para três regimes de segurança correntes (os quais dependem do nível de desaceleração aceite - ver definições no Quadro 2).

¹ Na Figura 2 o símbolo V^* corresponde à velocidade (V) ótima para a capacidade (C) máxima.

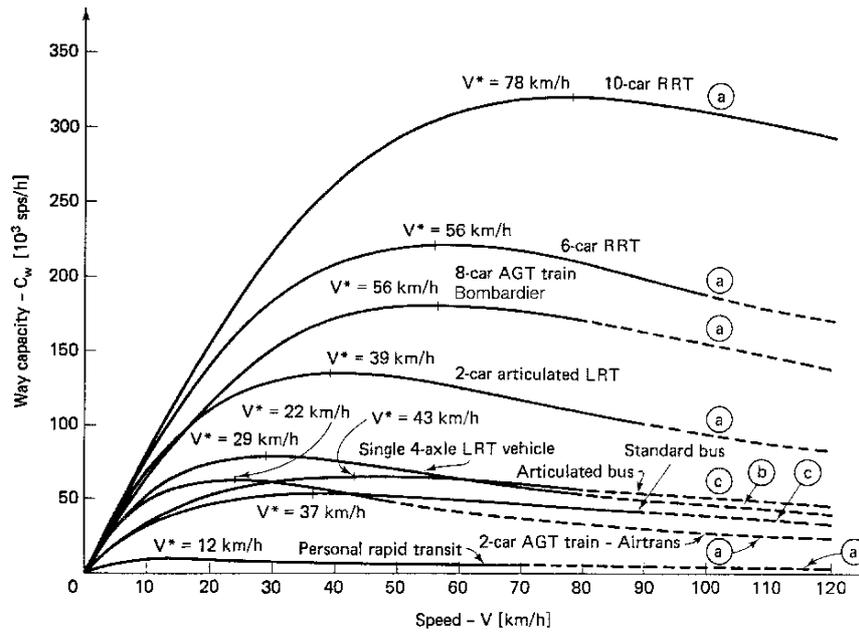


Figura 2 – Capacidades (passageiros) de ligações entre paragens para regimes de segurança correntes (Vuchic, 2007)

Quadro 2 – Regimes de segurança na operação de TP (Vuchic, 2007)

Regime de segurança		Desaceleração		Comentários
Ligação	Paragem	b1	b2	
a	a	∞	b_n	Segurança e conforto absolutos (originando um possível sobredimensionamento)
b	b	b_e	b_n	Elevada segurança mas não absoluta, para todos os valores de b_e e b_n
c	c		b_e	Segurança aceitável para a maioria dos sistemas (não automáticos). Se $b_e < 2b_n$, o nível de segurança é maior que no <i>regime de segurança b</i> . Desconforto para ocupantes no veículo seguidor.
d	-	∞	∞	
	d1	b_e	b_e	Desadequado para as situações de emergência
	d2	b_n	b_n	
e	-	0	-	Hipotético

b_e – desaceleração de emergência, usualmente de 3.0 ms^{-2} ;

b_n – desaceleração normal, usualmente 1.3 ms^{-2} .

O conceito de “**capacidade produtiva**”, que corresponde ao produto da velocidade comercial pela capacidade da linha – ou seja ao número máximo de lugares oferecidos por unidade de tempo – é importante na medida em que conjuga aspetos sensíveis quer para os utentes quer para os operadores.

Na Figura 3 apresentam -se, no lado esquerdo, a capacidade de linha, a velocidade de operação e a capacidade produtiva (como área) de vários modos de transporte de passageiros, agrupados de acordo com as classes mencionadas no Quadro 2. Representam -se também os veículos particulares em

arruamento (*Auto/streets*) e em estrada interurbana (*Auto/fw*). A figura permite verificar que o TP rápido tem os maiores valores e intervalos de valores admissíveis quer para a velocidade de operação quer para a capacidade da linha.

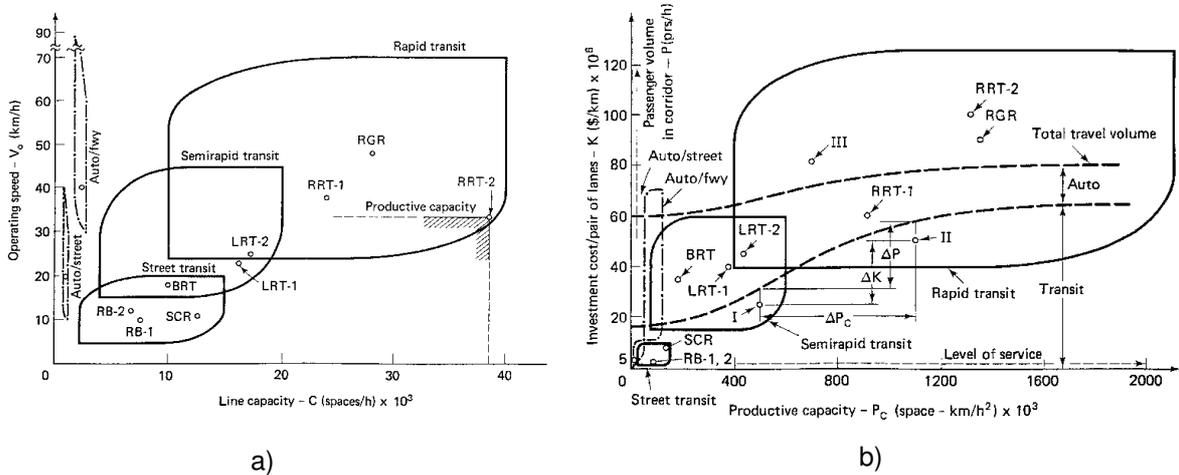


Figura 3 – Relações entre a) capacidade da linha e velocidade comercial e entre b) capacidade produtiva e investimento de vários modos de TP (Vuchic, 2007)

No lado direito da Figura 3 apresenta -se a relação entre custo de investimento e capacidade produtiva para vários modos de transporte de passageiros, também agrupados de acordo com as classes de ROW (*street transit* – Classe C; *semirapid transit* – Classe B; e *rapid transit* – Classe A). É possível verificar diferenças significativas entre os vários modos, designadamente que a máxima capacidade produtiva cresce 4 vezes quando se passa do TP em rua banalizada para TP semirrápido; crescendo 13 vezes quando se passa do TP em rua banalizada para TP rápido. Também é evidente o baixo desempenho do automóvel particular. Esta parte da figura também permite constatar que a comparação entre modos de transporte baseada apenas numa única dimensão (por exemplo, os respetivos custos) pode ser muito enganadora.

Os principais modos de TP têm, pois, domínios preferenciais de aplicação, havendo modos "próximos", com alguma sobreposição dos seus domínios, competitivos, como por exemplo o "minibus a pedido" e o autocarro banal; o elétrico rápido (LRT) e o metropolitano (RRT); ou o BRT e o LRT. Outros modos (como o táxi e o autocarro banal; ou o autocarro banal e o metropolitano, RRT) são tão diferentes que não são competitivos mas complementares.

2 Sistemas de transporte público rodoviário

2.1 Generalidades

Genericamente, os sistemas de transporte público rodoviário podem assumir três formas:

- Serviço de transporte público rodoviário convencional (TPR), em que os autocarros circulam em vias de tráfego partilhadas com outros veículos (*ROW* Classe C), segundo carreiras pré-definidas fixas e com horários regulares;
- Sistema de autocarros (*Bus Transit System* – BTS), que são serviços aperfeiçoados de transporte público rodoviário de passageiros, com coordenação das várias carreiras e tratamento preferencial dos autocarros, quer na atribuição de espaço de circulação quer na gestão do tráfego rodoviário;
- Sistema de autocarros rápidos (*Bus Rapid Transit* – BRT), que são sistemas integrados de transporte rodoviário de passageiros compreendendo autocarros e infraestrutura próprios, concebidos para funcionar de forma independente do restante tráfego.

Habitualmente, os sistemas de BRT têm apenas pequenos trechos de linha com *ROW* Classe C, disponibilizam carreiras distintas do restante transporte rodoviário, têm serviço frequente, pontual e com periodicidade regular ao longo do dia, têm paragens próprias e disponibilizam boa proteção dos passageiros, informação e dispositivos de pré-cobrança de bilhetes, entrada/saída rápidas, espaçadas de 300/600 m em zona urbana consolidada e mais em áreas suburbanas. Os autocarros de sistemas de BRT têm portas de grande débito, piso rebaixado ou plataformas de acesso altas, para rápida entrada e saída dos passageiros nas paragens, e é-lhes atribuída prioridade em todos os cruzamentos principais. Frequentemente os autocarros têm *design* diferenciado. Nestes sistemas também é corrente aplicar tecnologias de sistemas de transporte inteligentes (ITS), que permitem supervisionar a localização e o movimento dos veículos, prestar informação aos passageiros e realizar de forma eficiente a cobrança das tarifas.

Na configuração de um sistema de transporte público rodoviário há vários aspetos a considerar no que se refere aos veículos (tecnologia), à infraestrutura (paragens e ligações entre elas) e à operação do sistema.

Nos dois subcapítulos seguintes abordam-se alguns aspetos relevantes para as decisões de configuração das fases seguintes da Rede do Metro Sul do Tejo (RMST).

Os aspetos relacionados com os veículos rodoviários referem-se às dimensões máximas, tipologias, energia e sistemas de propulsão, carroçaria e arranjo interior, sistemas de apoio à condução e guiamento, autonomia, lotação, consumos e custos de aquisição. Os requisitos técnicos da infraestrutura referem-se à classe de direito de passagem (*ROW*), características de traçado, pavimento, equipamentos e configurações em zona protegida ou partilhada, quer em secção corrente

quer nos cruzamentos e nas paragens. Foram ainda estudadas algumas implicações em termos de custos.

É de salientar que, embora no presente documento os referidos aspetos sejam abordados de forma sequencial, num sistema de transportes há, necessariamente, inter-relações importantes entre as características dos veículos, da infraestrutura onde circulam e do regime de operação adotado, sendo fundamental que haja coerência de conjunto nas escolhas feitas para que o sistema seja eficaz e eficiente.

2.2 Aspetos relacionados com os veículos

2.2.1 Nota introdutória

Os veículos de transporte público de passageiros (autocarros) podem ser configurados de diversas formas, em função do tipo de serviço que se pretende que ofereçam, da infraestrutura rodoviária por onde circularão e do perfil do utilizador-alvo (mercado). Na configuração dos veículos são definidos diversos aspetos, designadamente: comprimento (lotação), tipo de corpo (rígido ou articulado), altura e número de pisos do veículo, número e disposição transversal e longitudinal das portas, percentagem e disposição dos lugares sentados, largura dos corredores e circulação, sistema de propulsão e *design* da carroçaria (aspeto exterior, área de janela e conforto).

As características dos autocarros têm impacto no desempenho do sistema de transporte público de que fazem parte, quer na velocidade comercial (ex. pisos rebaixados têm menores tempos de acesso), quer na confiabilidade dos horários e na capacidade (ex. portas de entrada e de saída e corredores largos asseguram tempos de espera em estação pouco variáveis e grande débito nos acessos ao veículo), quer na segurança rodoviária (pisos rebaixados têm menor risco de queda do que pisos com degrau) e pessoal (ex. janelas grandes vs. janelas pequenas), bem como na atratividade do sistema (ex.: conforto ou imagem de marca).

São vários os aspetos relevantes para a escolha dos autocarros para sistemas de TPR (designadamente BRT), uns diretamente relacionados com os veículos (sistemas de travagem e de suspensão, condições ambientais da cabina dos passageiros, sistema de propulsão, segurança e sistemas eletrónicos de apoio à condução) e outros de cariz técnico-organizacional das empresas operadoras, como a formação dos condutores, a operação do serviço, a conceção e projeto do parque de manutenção, a administração da *Garantia de Fábrica* e a inspeção do veículo na fábrica para receção da aquisição (Diaz *et al.*, 2004)

Tipicamente, os autocarros têm uma vida útil de cinco a 12 anos de tempo de vida útil e os tróleys de 15 a 22 anos. Esta duração facilita a adaptação dos sistemas de TPR a alterações na procura, nas exigências de conforto dos utentes e até no tipo de motorização e de guiamento.

2.2.2 Dimensões e pesos máximos dos autocarros

Atualmente, os limites relativos às dimensões e pesos máximos dos veículos que efetuam transporte entre Estados-Membros de mercadorias e de passageiros estão fixados na Diretiva 96/53/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho². Com a finalidade de harmonizar as massas e dimensões máximas dos veículos a motor e seus reboques estabelecidas nessa Diretiva com os requisitos técnicos definidos na Diretiva 70/156/CEE³, em 1997 foi publicada a Diretiva 97/27/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de Julho de 1997 relativa às massas e dimensões de determinadas categorias de veículos a motor e seus reboques e que altera a Diretiva 70/156/CEE. Por sua vez, a Diretiva 96/53/CE foi alterada em 2002, com a publicação da Diretiva 2002/7/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de Fevereiro de 2002.

A Diretiva 2002/7/CE foi transposta para o direito português mediante o Decreto-Lei n.º 133/2010, o qual foi corrigido pela Declaração de Retificação n.º 5/2011, de 18 de fevereiro de 2011.

Na Diretiva 70/156/CEE são definidas três subcategorias para os veículos com quatro ou mais rodas de transporte de passageiros (categoria **M**): a categoria **M1** corresponde aos veículos com menos de oito lugares para além do lugar do condutor; a categoria **M2** compreende os veículos com mais de oito lugares para além do assento do condutor e peso bruto não excedendo 5 t; e a categoria **M3**, para veículos com mais de oito lugares para além do lugar do condutor e mais de 5 t de peso bruto máximo.

No Quadro 3 sumarizam-se os valores definidos no Decreto-lei 133/2010 para automóveis pesados de passageiros.

Quadro 3 – Dimensões geométricas máximas legais dos veículos automóveis pesados de passageiros

Comprimento máximo	Autocarro articulado	18.75
	Autocarro com dois eixos	13.50
	Autocarro com mais de dois eixos	15.00
	Autocarro articulado	18.75
	Autocarro e reboque	18.75
	Conjunto veículo trator-semi-reboque de três ou mais eixos	16.50
Largura máxima	Qualquer veículo	2.55
	Superestruturas dos veículos de transporte condicionado	2.60
Altura máxima	Veículos a motor e seus reboques	4.00
	Automóveis pesados de passageiros da classe I	4.15 ^(*)
Capacidade mínima em movimento giratório	Coroa circular	Raio _{exterior} = 12.50 Raio _{interior} = 5.30

(*) – Os autocarros de dois andares têm entre 4.00 e 4.50 m de altura.

² Salienta-se que, de acordo com o princípio de subsidiariedade, a Diretiva também contempla as condições em que é possível conceder derrogações para a circulação de veículos que não cumpram os limites dimensionais definidos, designadamente em transportes especiais, em ensaios ou em combinações modulares.

³ A qual foi alterada mediante a Diretiva 2001/116/EC

Nas dimensões fixadas estão compreendidas as superestruturas amovíveis e os dispositivos de carga normalizados (como contentores). Igualmente, no caso de automóveis pesados de passageiros, o comprimento máximo fixado inclui quaisquer acessórios amovíveis neles instalados.

Na medição do comprimento dos veículos não são tomados em consideração diversos dispositivos, designadamente os limpa-para-brisas, as chapas de matrícula, as luzes, os espelhos retrovisores ou outros dispositivos auxiliares de visão para a retaguarda, os tubos de admissão de ar, bem como os degraus e rampas de acesso (desde que não constituam saliência superior a 200 mm).

Também na avaliação da largura dos veículos há dispositivos que não são considerados nas medições. É o caso, por exemplo, das luzes; dos dispositivos de controlo da pressão dos pneus, dos espelhos retrovisores, dos degraus e estribos retrácteis e das partes defletidas das paredes laterais dos pneus imediatamente acima do ponto de contacto com o solo.

Já na medição da altura dos veículos não são tomados em consideração dispositivos como as antenas de comunicação e os pantógrafos na sua posição mais elevada.

No Decreto-Lei 133/2010 são também definidos quatro requisitos de manobrabilidade a observar, dois dos quais aplicáveis aos autocarros:

- qualquer veículo a motor ou conjunto de veículos em movimento deve poder girar dentro de uma coroa circular com um raio exterior de 12.5 metros e um raio interior de 5.3 m;
- quando, a partir de uma aproximação em linha reta, o veículo entra na área circular acima descrita, nenhum dos seus elementos pode ultrapassar em mais de 0.6 m o plano vertical tangencial ao lado do veículo.

O peso bruto máximo dos veículos está estabelecido em função do respetivo número de eixos, sendo 19 t no caso dos veículos de dois eixos, 26 t para veículos de três eixos e de 32 t para veículos com quatro ou mais eixos. Os automóveis pesados de passageiros articulados com três eixos têm peso bruto máximo de 28 t; e os de quatro ou mais eixos estão limitados a 32 t.

Também há limites máximos ao peso bruto por eixo dos veículos, quando em circulação. Os eixos simples estão limitados ao máximo de 7.5 t no caso do eixo frontal (automóveis), 10 t para eixo não motor e 12 t para eixo motor. Nos eixos duplos os pesos brutos máximos são independentes da respetiva função (motor ou não motor) e dependem do valor da distância entre eixos: 12 t se essa distância for inferior a 1 m; 17 t se for compreendida entre 1 m e 1.29 m; 19 t se estiver no intervalo de 1.3 m a 1.79 m; e 20 t se for igual ou superior a 1.8 m. Nos eixos triplos (motores e não motores), os pesos brutos máximos por eixo dependem da correspondente distância entre os dois eixos extremos: 21 t no caso de essa distância ser inferior a 2.6 m; e 24 t se for igual ou superior àquele valor.

2.2.3 Sistema de propulsão

A forma mais comum de propulsão dos autocarros consiste no recurso a **motores de combustão interna (MCI)**, maioritariamente consumindo gasóleo ou, com menor prevalência, gás natural comprimido (GNC) ou líquido (GNL), e gasolina. Os motores a gasóleo têm ignição por compressão da

mistura combustível-comburente (ciclo *Diesel*); os restantes têm a ignição da mistura desencadeada por faísca (ciclo *Otto*).

Os motores a gasolina são mais usados em miniautocarros.

Com a tecnologia atual, os motores a gasóleo têm boa eficiência térmica e características de robustez, simplicidade e economia de operação, bem como fácil manutenção, o que justifica a sua popularidade.

No entanto, comparativamente à propulsão elétrica (de tróleys ou autocarros elétricos) têm piores características de aceleração no arranque e de velocidade de arrastamento em subidas íngremes – basicamente por grande variabilidade do binário disponível em regimes de rotação baixos (Vuchic, 2007). Outra desvantagem prende-se com as emissões aéreas, de partículas e de ruído (vibrações). Neste aspeto, nos últimos 20 anos a evolução dos requisitos normativos em matéria de emissões aéreas e de vibrações tem conduzido a diminuições significativas dos efeitos nocivos (ver Quadro 4).

Quadro 4 – Evolução dos valores limites de emissões preconizados na norma europeia aplicável a motores a gasóleo para veículos pesados (Fontes: Diretiva 2005/55/CE e <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>)

NÍVEL	DATA	CICLO	POLUENTE						
			CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	CH ₄ (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	PN (kWh) ⁻¹	Fumo (m ⁻¹)
Euro III	2000.10	ESC	2.10	0.66		5.0	0.10		0.8
		ETC	5.45	0.78	1.6	5.0	0.16		
Euro IV	2005.10	ESC	1.5	0.46		3.5	0.02		0.5
		ETC	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03		
Euro V	2008.10	ESC	1.5	0.46		2.0	0.02		0.5
		ETC	4.0	0.55	1.1	2.0	0.03		
Euro VI	2013.01	ESC	1.5	0.25		2.0	0.01	8.0×10 ¹¹	0.15
		ETC	3.0/4.0	0.40/0.16	0.65/0.50	2.0/0.46	0.02/0.01	6.0×10 ¹¹	

Notas: ESC – ciclo em estado estacionário; ETC – ciclo com modos transientes; CO – monóxido de carbono; HC – hidrocarbonetos; CH₄ - metano; NO_x – óxidos de azoto; PM – massa de partículas; PN – número de partículas.

Os valores assinalados a azul correspondem a divergências entre as duas fontes referenciadas.

Este progresso foi acompanhado pelo aumento nos custos de aquisição e de operação dos autocarros bem como na complexidade das operações de manutenção, com diminuição progressiva das vantagens deste tipo de motores, relativamente a outras soluções tecnológicas de propulsão, incluindo MCI com outros combustíveis.

Modernamente, estão disponíveis motores designados “gasóleo limpo” (*clean diesel*), que produzem níveis baixos de partículas cancerígenas mediante a combustão de gasóleo especial, com níveis muito baixos de enxofre, e tratamento dos gases de escape para diminuir a emissão de fuligem e de NO_x, através de filtros regenerativos e tratamentos à base de ureia catalítica. Os níveis de poluição deste tipo de veículos são semelhantes aos dos veículos a GNC; os custos de aquisição são, no entanto, consideravelmente superiores (Vuchic, 2007).

Estão em desenvolvimento MCI de próxima geração com potencial para menores emissões de partículas e de NOx, sem prejuízo da alta eficiência térmica dos MCI atuais.

Vuchic (2007) refere que quando comparados com os motores a gasóleo tradicionais, os motores a gás natural comprimido (GNC) dos autocarros (alguns sendo apenas motores a gasóleo com alteração na forma de ignição) têm menor desgaste e ruído, bem como gases de escape menos poluidores. Em contrapartida, são menos potentes (-20% para igual cilindrada), menos eficientes (maior emissão de CO₂ para igual potência), mais pesados e obrigam a manutenção em oficinas especializadas (por exemplo, há consumíveis diferentes, como as velas, que não existem nos MCI a gasóleo). Os autocarros a GNC são mais caros do que os equipados com MCI a gasóleo tradicionais.

Aos aspetos mencionados pode acrescer a necessidade de construir estações de abastecimento, compreendendo equipamento de compressão (GNC) ou liquefação (GNL) do gás natural, que ficam, basicamente adstritas à frota do operador dos veículos.

De acordo com a experiência relatada por alguns operadores nacionais, os autocarros com MCI a GNC apresentam alguma suscetibilidade à humidade e à água, sobretudo no início de cada dia.

Apesar da mencionada evolução nos MCI a gasóleo estar em linha com as políticas de transportes da EU, os objetivos de redução das emissões de carbono nos transportes preconizadas no Livro Branco de Transportes (EC, 2011) para as zonas urbanas têm sido acompanhados da promoção de formas alternativas de motorização dos veículos automóveis, incluindo os de transporte público de passageiros. Para as cidades está previsto diminuir para metade a utilização de automóveis a gasolina e a gasóleo nas cidades até 2030, retirá-los de circulação até 2050 e descarbonar a logística nas cidades até 2030.

A promoção dos veículos elétricos tem sido acompanhada pelo desenvolvimento e pela inovação nos campos dos sistemas de armazenamento de energia, designadamente das baterias, o que tem tornado crescentemente competitiva a propulsão de autocarros por meios elétricos automóveis (híbridos ou autónomos), para além dos recorrendo à distribuição por cabos aéreos.

Para além das baterias de chumbo e eletrólito ácido tradicionais, existem vários tipos de sistemas de armazenamento de energia suscetíveis de aplicação em veículos elétricos, como os volantes de inércia, condensadores, supercondensadores e as baterias de níquel-cádmio (NiCd), de hidreto metálico de níquel (Ni-MH), de iões de lítio e outras. Dois aspetos importantes na análise comparativa destes sistemas são a energia específica (a energia armazenada por unidade de massa) e a potência específica (a potência energética suscetível de ser fornecida por unidade de massa) do sistema.

A energia específica está relacionada com o período de tempo ou a duração do fornecimento da energia – quanto tempo pode o sistema alimentar o funcionamento de um motor. A potência específica determina as prestações do motor, em termos de binário e velocidade; no caso dos veículos automóveis está relacionada com as respetivas acelerações, designadamente no arranque, e a capacidade de vencer rampas.

As baterias para alimentação de veículos automóveis disponíveis no mercado resultam de um delicado compromisso entre capacidade de armazenamento de energia, potência disponibilizada, custo, tempo

de vida útil, segurança (estabilidade química), banda de temperaturas de serviço, toxicidade e rapidez de carregamento. Uma vez que alguns destes aspetos são contraditórios (ver Figura 4) tem sido possível maximizar simultaneamente apenas dois deles (Van den Bosch, 2014).

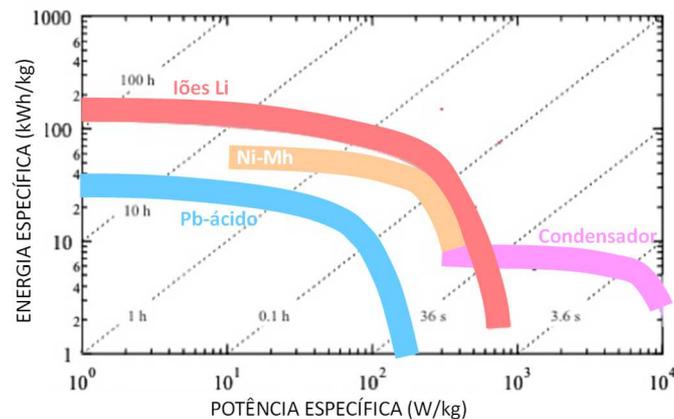


Figura 4 – Relação entre energia específica e potência específica nas baterias mais comuns no mercado, com indicação de tempos de descarga Ghoniem (2011)

Os custos das baterias têm registado diminuições mas ainda são elevados, sendo previsível que, com a generalização e produção em grande número, venham a baixar ainda mais⁴. As baterias de iões de lítio são, assim, a principal tecnologia de baterias recarregáveis de alta energia, cumprindo todos os requisitos necessários para uma bateria comercial: têm tempos de vida útil razoavelmente longos (entre 2 e 10 anos), são relativamente custo-eficientes (custando entre 240 e 400€/kWh), têm elevadas energias volumétrica e específica (600 a 700 Wh/l e 250 a 300 Wh/kg), capacidades para disponibilizarem alta potência e são suficientemente seguras para alimentar quer veículos automóveis quer equipamentos eletrónicos portáteis.

Subsistem problemas em caso de impacto e de incêndio, que obrigam a formação especializada dos bombeiros e das forças policiais intervenientes em acidentes rodoviários.

Os principais desafios à generalização dos autocarros híbridos e dos autocarros elétricos (*EBus*) incidem especialmente no desempenho das baterias e na configuração das infraestruturas elétricas de carregamento. No caso dos autocarros híbridos e *EBus* com carregamento ao longo do dia em pontos críticos das carreiras, a distribuição geográfica dos carregadores pode implicar alterações profundas na rede de distribuição elétrica (Lajunen e Lipman, 2016).

⁴ É de assinalar que esta tendência para continuação das diminuições nos custos das baterias é mencionada na generalidade das fontes estrangeiras; não tem, no entanto acolhimento nas informações obtidas no mercado nacional, as quais referem a estabilização dos custos nos valores atuais.

Genericamente, existem quatro formas de carregamento das baterias dos autocarros com propulsão híbrida ou elétrica:

- o carregamento integral prolongado no tempo, em garagem, durante a noite;
- o carregamento rápido, na maioria dos casos parcial, em garagem ou em paragens especialmente equipadas para o efeito;
- o carregamento suplementar mediante cabos de distribuição (para tróleis ou elétricos) ou espiras indutivas (WPT – *Wireless power transfer*) existentes ao longo de parte do trajeto;
- a troca de baterias, em oficina.

Apenas o último sistema parece não ter vingado, previsivelmente devido às exigências logísticas e de manuseamento que impõe.

Uma questão em aberto e não mencionada nos documentos acedidos tem a ver com o processamento das baterias após o fim da sua vida útil, uma vez que constituirão resíduos perigosos.

Os motores elétricos (ME) podem funcionar com corrente alternada (AC) ou contínua (DC). Atendendo à possibilidade de alterar o nível de rotação de um motor elétrico mediante modificações na voltagem ou na amperagem disponibilizadas, as engrenagens das caixas de velocidades são desnecessárias, o que permite o emprego de sistemas de transmissão simples e pequenos, bem como, nalguns casos a instalação de motores dedicados a cada um dos eixos dos autocarros. A pequena dimensão dos ME e a capacidade de transmissão direta do movimento possibilitam a adoção de sistemas de propulsão com motores individualizados para cada roda (*wheel hub drive*), o que confere conforto acrescido nas variações de velocidade e facilita a conceção de veículos com piso rebaixado (Björklund *et al.*, 2000).

Relativamente aos MCI, os ME apresentam variações de velocidade mais suaves, menores níveis de ruído, maior durabilidade, maiores investimentos nos sistemas de fornecimento de energia e menor diversidade de rotas permissíveis (condicionadas pelos cabos elétricos, catenárias e pontos de recarga de baterias). Observações realizadas em Estrasburgo, para obtenção de características cinemáticas de veículos de transporte público, permitiram medir amplitudes de aceleração de $+2.5 \text{ ms}^{-2}$ e -1.5 ms^{-2} nos elétricos e de $\pm 4 \text{ ms}^{-2}$ nos autocarros a gasóleo, a GNC e híbridos, simples e articulados (Toussaint, 2010).

Os ME também podem ser usados para travagem dinâmica, com o motor a funcionar como gerador de corrente, recuperando parcialmente a energia cinética do veículo e transformando-a em energia elétrica que é transmitida ao sistema de alimentação ou a um sistema de armazenagem, contribuindo para elevada eficiência energética dos veículos equipados com este tipo de motor. Uma vez que a travagem dinâmica não origina bloqueamento de rodas e não pode ser usada para paragem total de um veículo nem para o manter imóvel após paragem, estes veículos ainda necessitam de um dispositivo de travagem tradicional, por atrito. Este dispositivo não é tão solicitado como os sistemas de travagem mecânicos tradicionais.

Os motores DC caracterizam-se por elevada capacidade tratora inicial, fácil regulação da respetiva velocidade e elevada tolerância a variações na voltagem da corrente de alimentação.

Os motores de AC modernos apresentam algumas vantagens relativamente aos motores DC: são mais leves, em condições de igualdade de potência; têm construção mais simples; resistem melhor a condições atmosféricas adversas e são menos suscetíveis à água e à humidade; têm melhor aproveitamento energético (menor consumo); os custos de manutenção são menores; e é menor a suscetibilidade a interferência elétrica (Vuchic, 2007). Adicionalmente, os ME de AC podem ser controlados através dos atuais dispositivos de eletrónica (o que não acontece nos ME de DC, que são controlados por sistemas reostáticos) e a sua eficiência sob condições de carga parcial é superior à dos motores de DC rebaixado (Björklund *et al.*, 2000).

Os **tróleis** são veículos com motor elétrico que obtêm externamente a energia, habitualmente numa rede de fios colocada sobre as vias de circulação automóvel. Os tróleis têm níveis muito baixos de emissão de ruído e quase ausência de emissão de gases, tendo, também, maior durabilidade do que os autocarros com MCI a gasóleo. Relativamente a partículas, os tróleis apenas emitem as resultantes do contacto pneu-pavimento (borracha e betume) e do contacto na linha elétrica (metais). Num estudo ambiental realizado na cidade holandesa de Arnhem verificou-se que, quando comparados com autocarros de MCI, os tróleis emitem apenas 7% dos gases de NO_x, 3% de CO, menos de 1% de HC, 43% de SO₂, 73% de CO₂ e apenas 2% de partículas (Björklund *et al.*, 2000). No mesmo estudo constatou-se que a emissão de ruído dos tróleis é cerca de um quarto ($\frac{1}{4}$) do nível de emissões dos autocarros com MCI com melhor sistema de atenuação de ruído – 72 dB(A) vs. 78 dB(A), para a mesma velocidade.

A velocidade máxima dos tróleis ronda habitualmente os 60 km/h (havendo modelos que alcançam os 80 km/h) e podem atingir acelerações de 1.5 ms^{-2} até 70% da velocidade máxima (Zavada *et al.*, 2010). Relativamente aos autocarros tradicionais, os tróleis têm a desvantagem de ter menor liberdade de escolha de trajetória, uma vez que, em geral, não podem afastar transversalmente o seu eixo motor mais de 4.5 m do eixo dos fios de energia da catenária.

Modernamente, com recurso a sistemas de armazenamento de energia alguns modelos de tróleis podem realizar percursos próximos de 3 km sem contacto com catenária (Zavada *et al.*, 2010). A aplicação dos sistemas de propulsão dupla generalizou-se na década de 1980 (Björklund *et al.*, 2000).

Atualmente a maioria dos tróleis modernos tem ME de AC. Os custos de aquisição são mais elevados (cerca de 80%) do que os dos autocarros com MCI; no entanto, o tempo de vida útil médio dos tróleis oscila entre 15 a 22 anos (Zavada *et al.*, 2010), valor superior ao tempo de vida útil dos autocarros com MCI (5 a 12 anos). A experiência suíça demonstra que os custos de manutenção (fixos e variáveis) dos tróleis são apenas 7% superiores aos dos autocarros com MCI, resultando em custos por quilómetro percorrido próximos de 8.55 €, cerca de 18% superiores aos custos do autocarro com MCI (7.24 €/km).

Não obstante, a grande desvantagem dos tróleis relativamente aos autocarros com MCI decorre da necessidade de construir e manter a infraestrutura de distribuição local de energia, a qual habitualmente é realizada com cabos elétricos suspensos – cujo tempo de vida útil é superior a 22 anos. Relativamente aos elétricos, os tróleis caracterizam-se por o circuito elétrico ser fechado nos fios, não havendo transmissão local de corrente para o solo. No início da década de 2000 foi testado um sistema

alternativo de fornecimento da energia recorrendo a sistemas de placas condutoras embutidas no pavimento (Björklund *et al.*, 2000).

A empresa de transportes públicos da cidade austríaca de Viena promoveu uma interessante inovação nos sistemas de motorização de miniautocarros elétricos, na sequência da decisão de criar uma zona de emissão zero no centro histórico da cidade e que obrigou à gradual substituição dos autocarros com MCI a LPG por outros elétricos. Esta decisão poderia ter obrigado à construção de novas linhas de energia e de estações de carga nessa zona, o que teria sido muito caro. Em alternativa, verificou-se ser viável aproveitar a extensa rede preexistente de linhas aéreas de energia utilizada pelos elétricos e pelos tróleys para carregar os EBus, o que obrigou ao desenvolvimento de novas tecnologias para autocarros (Figura 5), uma vez que as linhas elétricas aéreas fornecem corrente contínua e o carregamento das baterias tem de ser feito com corrente alterna (Wiesingen, 2014).



Figura 5 – Autocarro elétrico com carregamento de baterias mediante linha aérea de tróley ou de elétrico

Segundo Qin *et al.* (2016) os autocarros **EBus de carregamento direto** (*plug-in*) atuais ainda têm elevado custo de aquisição. Por seu lado, os custos operacionais são variáveis em função da composição da produção da energia que consomem (ex., petróleo, carvão, gás natural, hidráulica, nuclear, solar ou eólica), do momento de efetivação dos carregamentos e da ponta de potência exigida à rede. Alguns estudos de avaliação da competitividade dos EBus já realizados permitiram concluir que estes autocarros podem ser vantajosos relativamente aos que consomem gasóleo, se a energia consumida for adquirida a baixo preço (Lajunen e Lipman, 2016).

Para este aspeto importa atender ao impacte da potência máxima exigida à rede no custo total da energia para um consumidor industrial. Este é um potencial fator de diferenciação entre os EBus com baterias de fosfato de ferro e lítio, de elevadas capacidade (200–300 kWh), autonomia (250 km) e duração de recarregamento (5 horas), e os EBus com baterias de titanato de lítio, com capacidade de

55-72 kWh, autonomia de 50 km mas necessitando de menos de 10 minutos para recarregar. No primeiro caso é possível recarregar as baterias com carregadores de 40-50 kW; já no segundo caso, o carregador pode atingir valores de 500 kW DC, para pleno aproveitamento da eficácia potencial no tempo de carregamento.

Refere-se, por exemplo, o caso do sistema TOSA, em teste na cidade suíça de Genebra, onde diversos *EBus* com baterias de titanato de lítio efetuam carregamento das baterias em algumas paragens (tipicamente a cada três ou quatro paragens ou 2 km), durante a operação de entrada e saída de passageiros (duração de 15 s). O carregamento dos autocarros é feito por ligação condutora, em carregadores de 400 kW, dotados com baterias para diminuir os picos de potência solicitada à rede. O carregamento pleno das baterias é obtido nas paragens terminais em cerca de quatro minutos.

Estas considerações justificam a importância atribuída ao desenvolvimento de estratégias de otimização dos carregamentos adaptadas a cada operador de *EBus* e ao contexto de cada linha de autocarros. No caso dos autocarros de carregamento rápido, Qin *et al.* (2016) estimaram que um operador na Florida poderia obter poupanças de 41% na fatura energética, se adotasse limites de recarregamento dentro da banda de valores ótimos.

Em 2011, o município português de Vila Nova de Gaia iniciou os testes comerciais de um autocarro Caetano Bus (Cobus 2500 EL) com capacidade para 25 passageiros sentados (total de 67 passageiros). O veículo tem autonomia entre 100 e 150 km sem passageiros, o equivalente a cerca de 8 a 10 horas. O recarregamento das baterias de 10% para 90% SOC (estado de carga) dura menos de 3 horas. O Cobus EL 2500 está agora certificado para funcionar em estradas públicas normais (Evans *et al.*, 2014).

Já são comercializadas diversos autocarros com propulsão dupla, a gasóleo/GNC e elétrica. Os primeiros veículos deste tipo foram desenvolvidos ainda na década de 1970, dispunham de motores individuais com controlos específicos, sendo o sistema montado complexo e pesado e, por isso, aplicado sobretudo em autocarros articulados.

Os autocarros híbridos têm um MCI, um motor elétrico e um sistema de armazenamento de energia, sendo cada motor usado em função do regime em que é mais eficiente: o motor elétrico é empregue para arrancar ou em situações em que é exigido elevado binário a baixas velocidades; e o MCI é acionado a velocidades de cruzeiro mais elevadas – em que combina as tarefas de propulsão do veículo e o carregamento dos sistemas de armazenamento de energia. Estes autocarros (tal como os *EBus*) também têm sistemas de travagem regenerativa. Os motores dos autocarros híbridos podem estar montados em série ou em paralelo.

Devido à possibilidade de usar ambos os tipos de motor em conjunto, os MCI dos autocarros híbridos podem ter menor potência (correspondendo a menores cilindrada e peso) do que os dos autocarros de propulsão dupla ou só com MCI. Os motores híbridos apresentam elevada eficiência, por corresponderem à utilização eficiente do MCI, do ME e dos equipamentos de armazenamento de energia; a interligação dos vários componentes do sistema de propulsão é, no entanto, ainda complexa. Por esse motivo, a manutenção destes autocarros é consideravelmente sofisticada e exige

especialização. Os custos de aquisição são cerca de 20% a 30% mais elevados do que os custos dos autocarros com MCI; é expectável que o aumento da escala de produção deste tipo de veículo permita diminuições nestes custos.

Nas simulações realizadas por Lajunen e Lipman (2016) verifica-se que os recentes desenvolvimentos tecnológicos nos motores e outros componentes elétricos do sistema de tração dos autocarros permitem considerar os autocarros híbridos e os *Ebus* como competitivos relativamente aos autocarros com MCI (a gasóleo e a GNC), não só em termos de eficiência energética mas também na evolução crescentemente favorável das respetivas relações custo-eficácia. Os *Ebus* têm consumos de energia muito baixos, o mesmo sucedendo com as correspondentes emissões de CO₂ (desde que no contexto da produção de energia elétrica da respetiva rede não haja uma grande componente de combustíveis fósseis).

No Quadro 5 apresenta-se uma tabela com uma súmula dos resultados comparativos obtidos no projeto europeu *Clean Fleets* (CIVITAS, 2016).

Quadro 5 – Comparação entre vários tipos de motorização de autocarros urbanos (Vuchic, 2007)

Autocarro	Prestações					Reabastecimento				Gases			Ruído		Custo (€)
	Eficiência energética	Combustível	Autonomia (km)	Flexibilidade	Acelerações	Consumo (kWh/km)	Frequência diária	Tempo (mn)	Infraestrutura	CO ₂ (*) (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)	Parado (dB)	Movimento (dB)	
Gasóleo Euro VI	40%	Gasóleo + FAME	600 a 900	Alta	Bom	4.1	0.5	5 a 10	PMO	1317	0.5 a 1.1	0.015	80	77	200000
GNC	<40%	GNC	350 a 400	Alta		5.2	0.5 a 1	5 a 10	Compressor + tanque	1277	<1	<0.01	78	78	250000
GNL		GNL	600 a 900												
Biofuel		FAME / HVO	570 a 850	Alta	Bom	4.1	0.5	5 a 10	PMO ou especial	391 a 1487	0.5 a 1.1	0.015	80	77	220000
Bioetanol		Gasóleo + 15% Etanol	400 a 600	Alta	Bom	4.1	0.5 a 1	5 a 10	PMO ou especial	137 a 1279	0.5-1.1	0.015	80	77	250000
Ebus carreg. oport. de baterias		Electricidade	<100	Limitada		1.4	Várias vezes	5 a 10	Especial	0 a 1474	0	0	69	73	320000 a 500000
Ebus carreg. noturno de baterias		Electricidade	100 a 250	Alta		1.6	1	180 a 300	Especial	0 a 1474	0	0	69	73	500000 a 320000
Trólei		Electricidade	ilimitada	Baixa	Bom	1.4	Na	Na	Linha de distribuição	0 a 1474	0	0	69	73	400000 a 450000
Híbrido elétrico paralelo		Electricidade + Gasóleo/GNC	600 a 900	Alta	Médio	3.3	< 0.5	5 a 10	Especial, se plug-in	1050	0.5 a 1.1	0.015	69	73 a 78	220000 a 300000
Híbrido elétrico série		Electricidade + Gasóleo/GNC	600 a 900	Alta	Médio	3.3	< 0.5	5 a 10	Especial, se plug-in	1050	0.5 a 1.1	0.015	69	73 a 78	220000 a 300000
Hidrogénio		Electricidade + hidrogénio	200 a 400	Alta		3.1	1	10	Especial	47 a 2849	0	0	69	73	800000

(*) - Well to wheel

É ainda de referir o desenvolvimento de autocarros com células de combustível (Eudy, *et al.*, 2015)), que, no entanto, de acordo com os resultados do projeto europeu *NextHyLights*, só é expectável que venham a ter custos semelhantes aos dos autocarros com MCI a gasóleo, entre 2025 e 2030 (Zaetta e Madden, 2011).

2.2.4 Carroçaria

O *design* da carroçaria dos autocarros tem influência nas características do serviço prestado na carreira que servem. Todos os tipos de motor são aplicáveis nas várias categorias de carroçaria, embora possam influenciar a lotação máxima, em virtude das dimensões do motor e dos sistemas auxiliares bem como das características do sistema de transmissão.

A lotação dos autocarros usados numa carreira está diretamente relacionada com a respetiva capacidade, condiciona a frequência de passagem e afeta a velocidade operacional, o dimensionamento das paragens, a regularidade e confiabilidade (pontualidade) dos horários (Vuchic, 2007). Segundo este autor, é expectável que uma carreira com intervalos de 2 minutos entre autocarros articulados tenha velocidades comerciais maiores e melhor regularidade de serviço do que se a carreira for servida por autocarros normais com intervalos entre veículos de 1.5 minutos. Para o mesmo autor, tempos médios de espera de 1 a 1.5 minutos são plenamente satisfatórios, sendo desejável que os tempos de espera não ultrapassem o intervalo de 3 a 6 minutos. Para igual volume de procura, quanto maior a dimensão do autocarro, maior o conforto (exceto no caso de alguns autocarros articulados ou com dois andares) e menor a manobrabilidade e o custo do serviço (lugar×km) disponibilizado.

No Quadro 6 apresenta-se uma classificação dos autocarros mais comuns em seis categorias, com indicação das gamas de valores correntes para respetivos comprimentos e lotações – lugares sentados e de pé (Vuchic, 2007).

Quadro 6 – Categorias de carroçarias de autocarros

Autocarro	Comprimento (m)	Lotação	
		Assentos	Total
Mini	6 – 7	12 – 20	30
Midi	8 – 10	16 – 30	50
Normal (<i>Standard</i>)	10 – 12	35 – 55	85
Articulado	16 – 18	40 – 75	130
Duplamente articulado	22 – 24	40 – 80	140
Dois andares	10 – 12	60 – 95	125

A escolha da categoria de autocarro para uma determinada carreira depende fundamentalmente do volume de passageiros a transportar, das frequências de passagem desejadas e admitidas e dos custos de aquisição e operação dos veículos, sujeitos à viabilidade da inscrição nas rodovias do percurso. Na Figura 6 apresentam -se relações típicas (Vuchic, 2007).

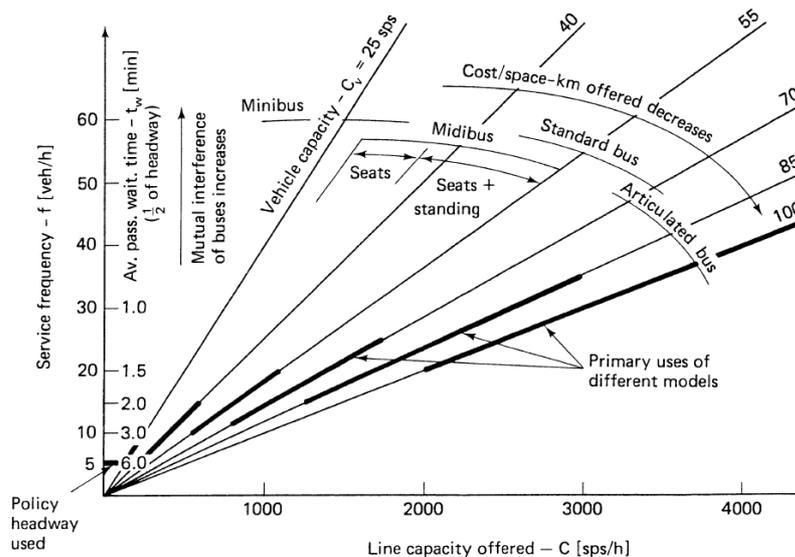


Figura 6 – Relações entre categoria ótima dos autocarros, procura de transporte, frequência de serviço e custos de operação (Vuchic, 2007)

Para níveis de procura não muito elevados, os autocarros mais pequenos são especialmente adaptados a critérios de frequência mínima, atendendo aos baixos consumos e custos de manutenção. Para carreiras com média a elevada procura os autocarros maiores são vantajosos em termos de custos de operação e de confiabilidade do serviço.

2.2.5 Guiamento

Um sistema de transporte público em autocarros dotado de guiamento automático tem diversas vantagens relativamente a um sistema tradicional sem essa particularidade. Com efeito, um sistema desse tipo é mais facilmente associado à imagem de qualidade de serviço ferroviária; os condutores estão sujeitos a menor nível de carga mental de condução; os custos de construção das infraestruturas são menores, designadamente por diminuição da largura das faixas de rodagem, da superfície pavimentada e da área de expropriação; o tempo de imobilização nas paragens de autocarros é menor, uma vez que a acessibilidade dos passageiros idosos e deficientes é mais fácil; e os níveis de segurança rodoviária podem ser maiores, por diminuição da frequência de erros do condutor.

As vantagens acima enumeradas são particularmente relevantes nos casos em que o guiamento não envolve dispositivos que impeçam os veículos de realizarem parte do percurso com guiamento convencional, por motorista devidamente encartado. Teoricamente, os trechos com guiamento permitem larguras de ocupação inferiores, proporcionam maior nível de segurança (com prevenção de despistes) e possibilitam maiores velocidades de circulação do que as permissíveis nos trechos de guiamento convencional. Adicionalmente, nas paragens o rigor no posicionamento do veículo permite a utilização de cais com plataformas de acesso sobrelevados, ao nível do chão dos autocarros de piso alto.

Nos sistemas de transporte público rodoviários já foram aplicados diversos tipos de sistemas de guiamento de autocarros.

Na década de 1980 foi desenvolvido e testado em Essen, na Alemanha, um sistema de **guiamento mecânico de autocarros**, recorrendo a um sistema composto por lancis e rodas de guiamento laterais (Figura 7). O sistema tem mais de 6 km de comprimento, incluindo uma secção em túnel.



Figura 7 – Autocarro com guiamento mecânico (<http://citytransport.info>)

Como referido, nos sistemas mecânicos a infraestrutura pode ser dotada de lancis laterais nas extremidades da “faixa de rodagem”, afastados de 2.6 m e com cerca de 0.20 m de altura, sobre os quais são aplicadas as rodas laterais instaladas na parte frontal dos veículos e que permitem que estes encarrem no percurso e sigam as trajetórias pré-definidas. Quando o percurso guiado acaba, o condutor recolhe as rodas laterais na zona de transição (Figura 8) e o autocarro passa a ser guiado da forma convencional. Nas zonas de transição a velocidade de circulação está limitada ao máximo de 40 km/h (25 mph).



Figura 8 – BRT de Adelaide: zona de entrada e saída no canal guiado (Philips, 2006)

Para além de Essen existem sistemas deste tipo em diversas cidades: Mannheim (Alemanha), Luton (13 km), Cambridge (11km), Manchester (7.5 km) e Leeds (Reino Unido); Adelaide (Austrália), com 12 km, frequências de um autocarro por minuto no período de ponta e velocidade máxima de 100 km/h; e Eugene, com 6.6 km (EUA).

Construtivamente, as vias de circulação podem ser realizadas através de vigas de betão de cimento pré-fabricadas (Figura 8), assentes em travessas de betão fundadas em duas estacas curtas cravadas (em Adelaide, num trecho em terreno lodoso foram usadas quatro estacas de 3 m), ou através de betão armado contínuo moldado *in situ* (Figura 7 e Figura 9). Uma vez que a drenagem pode ser realizada através da zona central, não circulada, os custos das vias de circulação são semelhantes aos custos de uma estrada normal equivalente (Philips, 2006).

O guiamento mecânico tem a vantagem de não ser afetado por alterações eletromagnéticas espúrias nem por condições atmosféricas adversas (chuva, neve, gelo ou nevoeiro), suscetíveis de alterar quer as condições de aderência dos pneus à superfície do pavimento quer a visibilidade dos indicadores de direção (Vuchic, 2007).



Figura 9 – Autocarro guiado do BRT de Manchester (TfGM, 2015)

No quadro do desenvolvimento dos sistemas de transporte inteligentes (ITS), desde o início dos anos 1980 têm sido desenvolvidas diversas técnicas para apoio automático à tarefa de condução (ADAS) e, mesmo, de **guiamento eletrónico automático** dos veículos automóveis.

Num sistema de guiamento eletrónico o veículo segue uma sequência de estímulos eletromagnéticos, provenientes de marcadores instalados na superfície do pavimento ou de sinais provenientes de uma rede de posicionamento pré-referenciado. Os estímulos podem ser ativos ou passivos, servindo para detetar o desvio lateral do veículo relativamente ao eixo da via de tráfego. O valor deste desvio é processado por um computador, onde o comando de guiamento necessário à sua gestão (manutenção ou diminuição) é calculado e enviado para um sistema de acionamento da direção. Geralmente este

sistema de condução por fio (*drive by wire*) é constituído por um motor elétrico que atua sobre o sistema de direção, designadamente a coluna de direção.

Genericamente um sistema de guiamento eletrónico tem um conjunto de subsistemas para: **detetar a posição do veículo; atuar a direção**; centralizar os comandos do condutor e os dados dos sensores de deteção de posição e de estado do veículo, efetuar cálculos de síntese desta informação e gerar os comandos apropriados, que são enviados aos atuadores relevantes (através do controlador); mediar a comunicação do condutor com o automatismo (através da interface homem-máquina); e detetar falhas e gestão de contingências (ver Figura 10).

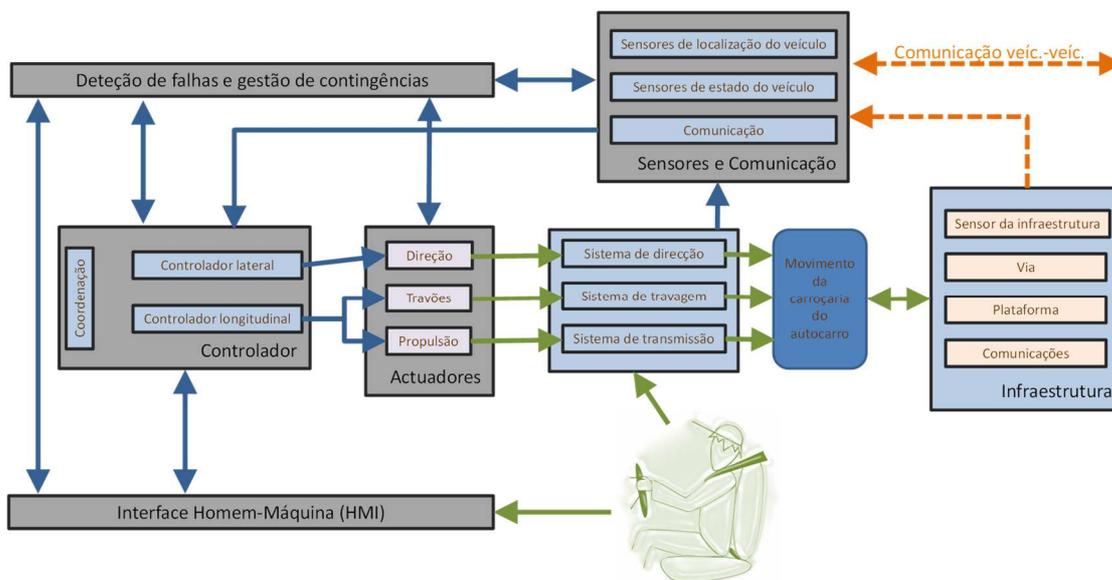


Figura 10 – Componentes e diagrama funcional de um sistema de apoio ao guiamento em via. (Adaptado de Tan et al., 2009)

Os sistemas de guiamento eletrónico podem ser distinguidos pelo tipo de sensores que são usados para determinar o desvio lateral do veículo, sendo que, em qualquer caso, os sistemas de sensores aplicados têm requisitos de alta exatidão, largura de banda, robustez e redundância. Atualmente são conhecidos sistemas de guiamento automático com nível de estágio existem sistemas de guiamento magnéticos e através de visão artificial (estes, por sua vez podem recorrer a marcas especiais, colocadas para o efeito, ou apenas à configuração da envolvente rodoviária).

Nos sistemas de **guiamento automático magnético** o veículo está equipado com magnetómetros que medem a força do campo eletromagnético e que permitem seguir uma sequência de estímulos eletromagnéticos, provenientes de marcadores instalados na superfície do pavimento, distanciados de 4 a 5 m ou de um cabo enterrado na estrada. Atualmente há referências a um sistema deste tipo com nível de preparação tecnológica TRL 7 (demonstração de protótipo em ambiente operacional bem-sucedida).

O guiamento magnético não é afetado por fatores ambientais como o nível de iluminação e as condições climáticas nem pelo estado da superfície do pavimento. Este guiamento é suscetível de elevada exatidão do posicionamento e também constitui suporte para codificação binária de informação complementar relevante (por exemplo, curvatura de estrada ou referenciação do marco hectométrico). No entanto, estes sistemas não são isentos de limitações: a existência de peças metálicas ferrosas nos autocarros – designadamente elementos estruturais – pode distorcer o campo magnético local e criar ruído dificilmente identificável e filtrável, em especial se estiver associado a peças móveis. Igualmente, o mau posicionamento dos marcadores pode contribuir para diminuir a relação sinal/ruído, afetando negativamente o desempenho da deteção da trajetória. É também de referir que a intensidade do campo dos marcadores varia com o quadrado da distância do detetor, pelo que o espaço onde é possível detetar desvios relativamente à trajetória pretendida é limitado transversalmente e, para distâncias superiores a um determinado limiar crítico, não é possível corrigir automaticamente eventuais desvios (Tan *et al.*, 2009). Nos EUA, em testes de guiamento automático de circulação de autocarros rígidos (comprimento de 12m) e de autocarros articulados (18 m) realizados em 1997, foram atingidas exatidões de 0.15 m a velocidades de 105 km/h (65 mph); no que se refere ao estacionamento, obtiveram-se, nessa altura, valores de exatidão transversal de 0.02 m e de exatidão longitudinal de 0.15 m (Tan *et al.*, 1999).

Mais recentemente, testes realizados na Califórnia em ambiente real (Figura 11) permitiram verificar desvios padrão do erro de trajetória de circulação de 0.105 m (0.072cm fora das trajetórias curvas em 'S', de entrada e de saída das paragens, que têm 24 m de extensão); o desvio padrão do erro foi de 0.0067 m na posição de estacionamento e de 0.13 graus no ângulo relativamente à plataforma (Tan *et al.*, 2009). Neste sistema o caminho de guiamento está definido através de ímanes colocados no pavimento, distanciados de 1 m. Nestes testes também ficou demonstrada a capacidade de interferência do condutor, uma vez que o condutor teve de intervir em 10 dos 35 testes realizados, desligando ou anulando o automatismo, para evitar obstáculos surgidos inesperadamente na via de tráfego; em todas as circunstâncias os condutores puderam repor o automatismo, logo que o obstáculo foi ultrapassado.

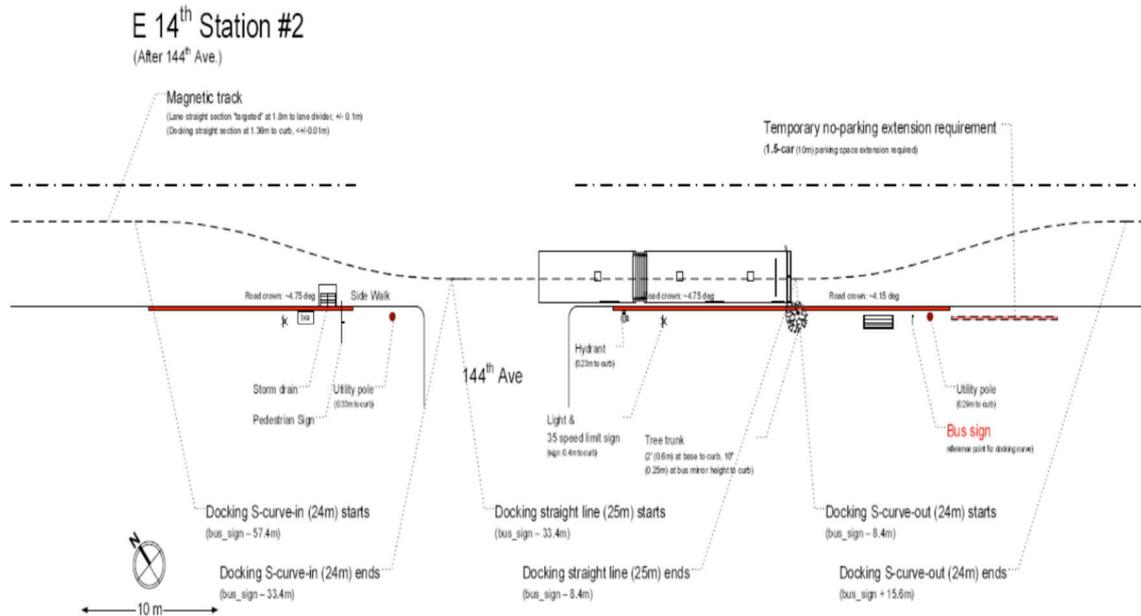


Figura 11 – Esquema de um dos testes de estacionamento em paragem (Tan *et al.*, 2009)

O **guiamento automático ótico** baseia-se nos princípios do processamento de imagens. Um *scanner* na frente do veículo varre a superfície do pavimento e as duas marcas longitudinais que representam o caminho de referência são reconhecidas através de algoritmos de processamento de sinal. Essa informação é enviada para um computador de bordo, que os combina com parâmetros dinâmicos do veículo – por exemplo, velocidades de rotação (guinada e rolamento) e velocidade linear – e calcula a relação entre a trajetória do veículo e as linhas definidoras da trajetória ideal, bem como as ações necessárias para alinhar o veículo com este caminho, transmitindo automaticamente os correspondentes comandos ao sistema de direção.

Genericamente, o guiamento ótico não obriga a grandes modificações na infraestrutura (em especial nos casos de processamento de informação não estruturada) mas a exatidão na colocação das marcas é muito grande, da ordem de 1 mm, o que obriga a apoio topográfico na colocação das marcas, e impõe grandes exigências de desempenho da superfície do pavimento (na construção) da resistência do mesmo a deformações durante a vida da obra

O guiamento ótico pode ser afetado negativamente por características desfavoráveis de iluminação, atmosféricas (chuva, nevoeiro e fumos) e de conspicuidade dos eventos a reconhecer. Tecnicamente, a exatidão potencial depende da definição dos sensores (o número de pixels correspondentes aos eventos relevantes), sendo que esta é condicionada pela capacidade dos processadores de sinal empregues.

Os autocarros *Civis*, em circulação em Rouen, Clermont-Ferrand e Las Vegas, são um exemplo pioneiro de veículos com guiamento ótico (ver Figura 12).



Figura 12 – Sistema Civis, com orientação ótica, em Rouen (Systra, 2016)

Num percurso são possíveis dois modos de condução:

- Modo assistido, no qual o guiamento (posição do veículo em relação à trajetória materializada) é controlado pelo sistema;
- Modo manual, no qual o guiamento é assegurado exclusivamente pelo condutor do autocarro, pelos meios tradicionais.

Em modo assistido o sistema apenas assegura o guiamento, pelo que o condutor tem sempre de seleccionar a velocidade de circulação (aceleração ou travagem) e manter a vigilância das condições da envolvente rodoviária e das situações de tráfego, designadamente visibilidade, estado do pavimento, desimpedimento da via, regulação de interseções, atravessamento de peões e interações com outros utentes. Trata-se de um sistema automação de nível 1, anotando-se que, neste caso, não há subsistemas para verificação do sucesso na transmissão do controlo completo para o condutor, em caso de saída do modo assistido.

A HMI do sistema é muito simples, compreendendo botões de acionamento pelo condutor (para ligar/desligar o sistema e ativá-lo/desativá-lo), avisos visuais (sistema ligado) e advertências sonoras (saída do modo assistido).

Na acostagem o sistema funciona até velocidades de circulação da ordem dos 30 km/h a 40 km/h, sendo a acostagem feita sem contacto entre os pneus e a plataforma de embarque, com distâncias máximas ao lancil da mesma de 3,5 cm. A velocidade máxima operacional já validada é de 50 km/h, correspondendo à velocidade máxima de teste de 70 km/h. Segundo o fabricante, presentemente o sistema está a ser adaptado para aplicação nos Jogos Olímpicos de Tóquio, onde se espera obter 70 km/h de velocidade máxima operacional (Cardoso *et al.*, 2019).

A disponibilidade (taxa de funcionamento correto) do sistema (em Rouen) é de 9998,5/10000, conforme recolha de indicadores-chave de desempenho, realizada em cada acostagem dos veículos, através de uma unidade de registo de dados e sua transmissão para o controlador operacional. O sistema tem um nível de integridade de segurança SIL2.

No que se refere à largura de canal necessária para a operação dos autocarros, obtiveram-se os seguintes valores típicos para *gabari*s (zona livre de obstáculos em circulação normal) a 40 km/h e em curva em planta com 100 m de raio:

- *gabari* nominal de 2,64 m;
- *gabari* dinâmico de 3,15 m.

O *gabari* nominal corresponde ao espaço indispensável à inscrição física do veículo numa determinada trajetória; o *gabari* dinâmico inclui, adicionalmente, espaço para comportar a tolerância relativamente a inexactidões no guiamento lateral, eventuais desvios laterais provocados pelo vento ou acelerações transversais, o rolamento, e uma largura livre mínima até obstáculos fixos.

É de salientar que, de acordo com a informação prestada pela Siemens, os *gabari*s a considerar num sistema de transporte rodoviário de passageiros são específicos desse sistema, devendo o cálculo dos *gabari*s ser contextualizado às características da infraestrutura e dos veículos a empregar. O sistema *Optiboard/Optiguide* foi concebido de modo a que o *gabari* de utilização seja idêntico ao de um veículo com guiamento manual.

A combinação com outros ADAS, como o aviso de colisão frontal (*forward collision warning*) e o controlo adaptativo de cruzeiro (*adaptive cruise control - ACC*) possibilita a obtenção de acelerações mais suaves, com maior conforto dos passageiros.

Nos testes já realizados, verificou-se que o guiamento eletrónico de autocarros apresenta dificuldades diferentes do guiamento mecânico e do guiamento ferroviário, em especial devido às variações bruscas nas pendentes da superfície em locais como o eixo de faixas de rodagem em reta (sem sobrelevação), intersecções, tampas de caixas de visita de coletores, grelhas de sumidouros, fendas e buracos. Para lidar com estas irregularidades de forma rigorosa, é necessário dispor de sistemas de controlo não-linear potentes e inteligentes. Acresce que, por vezes, há objetos – postes, candeeiros, sinais de trânsito, peões ou árvores – junto à extremidade da faixa de rodagem que, na zona das paragens, podem ficar muito próximos dos espelhos retrovisores dos autocarros, em especial se o pavimento ou os autocarros tiverem rolamento para o exterior nessas zonas (Tan *et al.*, 2009).

Igualmente se constatou que é importante poder dispor de flexibilidade na operação: o controlo da direção deve ser suficientemente robusto para permitir o seu uso sob condições de circulação quer a velocidade elevada quer em regime de “pára-arranca” (congestionamento) e, genericamente, todos aqueles em que o autocarro possa ter de circular. Este aspeto é particularmente relevante se for previsto o autocarro não circular sempre em canal fechado e poder vir a circular em condições de tráfego normal, misto.

O sistema também deve ser de fácil uso, confiável e, preferencialmente, estar equipado com vários métodos de transição entre o controlo manual e o automatizado, em especial se o autocarro circular em condições de tráfego misto. Igualmente devem ser previstos avisos relativamente a curvas de pequeno raio e às paragens, prevenindo os passageiros relativamente às correspondentes acelerações.

2.2.6 Requisitos de largura de via e de faixa de rodagem

Na Figura 13 apresentam-se as dimensões de um autocarro de corpo rígido mais relevantes para avaliação da manobrabilidade e para dimensionamento da infraestrutura de uma carreira.

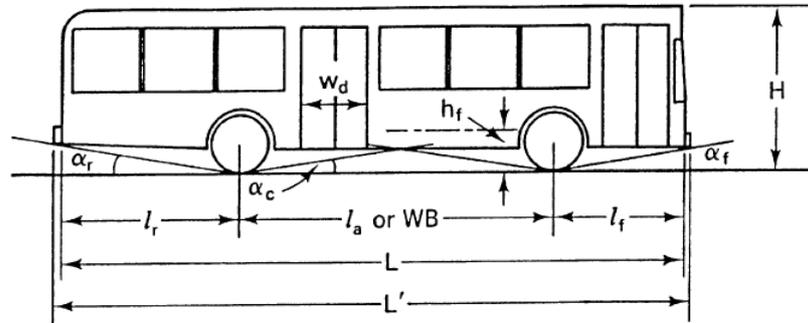
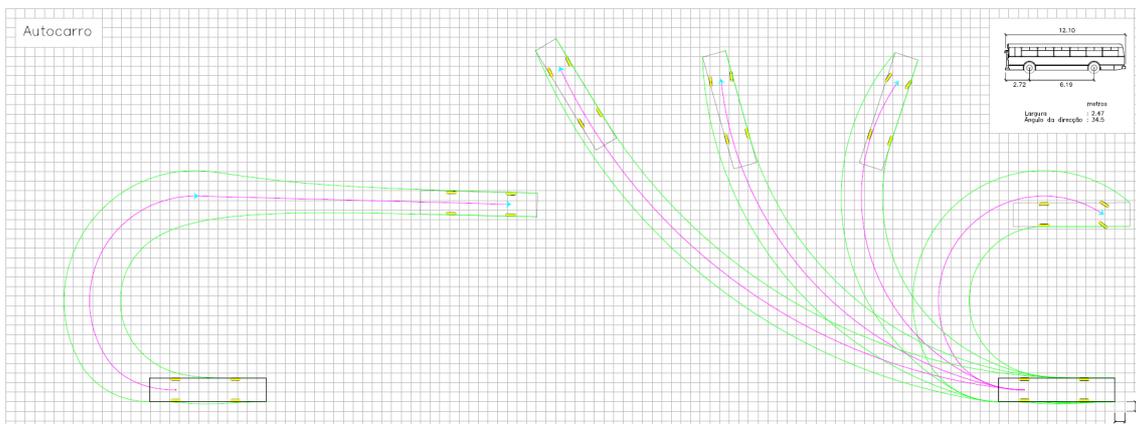


Figura 13 – Características geométricas da carroçaria de um autocarro com impacto na manobrabilidade

A altura ao solo do autocarro condiciona a altura dos lancis nas paragens de autocarro e ao longo do percurso. Combinada com a distância entre eixos (WB), o avanço dianteiro (L_f) e o avanço traseiro (L_r) e a altura ao solo determina o valor dos ângulos α_c , α_r , e α_f , respetivamente, os quais condicionam a altura e comprimento das lombas, passagens para peões elevadas e outros dispositivos de acalmia de tráfego por acelerações verticais.

As características geométricas de giração dependem do ângulo de viragem dos eixos direcionais⁵, do comprimento e largura do autocarro, da distância entre eixos e do avanço dianteiro; sendo também afetadas pela velocidade da manobra.

Na Figura 14 apresentam-se exemplos de zonas de varredura de autocarro de corpo simples com 12 m de comprimento, para vários ângulos.



⁵ Alguns modelos de autocarros articulados têm o eixo traseiro direcional, conseguindo, dessa forma, inscrever-se numa zona de varredura semelhante à de um veículo rígido.

Figura 14 – Características geométricas de giração de um autocarro para vários tipos de manobra – zona de varredura (Macedo *et al.*, 2010)

A largura corrente dos autocarros é de 2.50 m, o que corresponde ao valor máximo legal (ver 2.2.2).

As larguras de faixa de rodagem para autocarros dependem da velocidade máxima de circulação pretendida. No Quadro 7 são apresentados os valores mínimos a considerar em reta, que já permitem as oscilações da carroçaria dos veículos, devidas a desvios de trajetória (motivados pelo vento, reações ou competência do condutor) ou ao rolamento.

Quadro 7 – Largura (m) de faixa de rodagem para autocarros (ASVV, 1998)

	50 km/h		70 km/h	
	Desejável	Mínimo	Desejável	Mínimo
Sentido único	3.60	3.30	3.60	3.50
Dois sentidos	7.30	7.10	7.70	7.50

Aos valores apresentados há que acrescentar desobstruções laterais de 0.30 m, no caso de obstáculos pontuais, e de 1.00 m, no caso de paredes contínuas (por exemplo de túneis), para acomodar distâncias de conforto do condutor relativamente ao perigo de embate em obstáculos.

Quadro 8 – Sobrelargura de via para autocarros (ASVV, 1998)

Raio da curva (m)	Sobrelargura de via (m)
≥ 300	0
150-300	0.25
100-150	0.40
80-100	0.50
70-80	0.55
60-70	0.65
50-60	0.75
45-50	0.85
40-45	1.00
35-40	1.15
30-35	1.35
25-29	1.60
20-25	2.00

Nas curvas em planta crescem, ainda, os valores da sobrelargura, necessária por motivos geométricos. No Quadro 8 apresentam-se os valores de sobrelargura para autocarros europeus (ASVV, 1998), aplicáveis por via, em curvas com mais de 10 m de desenvolvimento; no caso de curvas com

desenvolvimentos inferiores o valor de sobrelargura pode ser calculado por interpolação linear entre o valor de extensão da curva em apreço e o valor de 10 m (por exemplo, para uma curva com 7 m de desenvolvimento o valor de sobrelargura é 7/10 do valor indicado no Quadro 8). Em arruamentos, a sobrelargura deve ser aplicada numa extensão não inferior a 10 vezes o valor da sobrelargura; pelo menos metade do valor da sobrelargura deve estar aplicado no início da curva; a sobrelargura deve estar aplicada integralmente a 10 m de distância do início da curva.

Em casos especiais a largura da faixa de rodagem pode ser definida como a largura do veículo padrão acrescida do espaço necessário, de cada lado da faixa de rodagem, para as oscilações de trajetória e o rolamento habituais (distância d_h). A estes valores acrescem as desobstruções laterais, relativamente a obstáculos na berma (e_1), postes e sinais (e_2) e paredes contínuas (e_3). Os valores de referência dependem da velocidade de circulação expectável, sendo apresentados no Quadro 9 os valores de referência holandeses (ASVV, 1998). As quatro distâncias mencionadas são medidas a partir do contorno do veículo, para o intradorso do raio interior da zona de varredura; apenas e_2 e e_3 têm de ser acrescentados ao raio exterior da zona de varredura.

Quadro 9 – Desobstruções para vias de autocarros em linha reta (ASVV, 1998)

	Velocidade (km/h)			
	15	30	50	70
d_h	0.30	0.30	0.40	0.50
e_1	-	0.40	0.50	0.60
e_2	-	0.60	0.80	1.00
e_3	0.15	1.00	1.20	1.40

Nas proximidades das paragens de autocarros e nas áreas de circulação dos parques de materiais e oficinas é recomendável que as larguras de via sejam verificadas relativamente a todas as manobras potencialmente possíveis, em função das correspondentes áreas de varredura.

2.3 Aspectos relacionados com a infraestrutura

2.3.1 Preâmbulo

A infraestrutura destinada a veículos de transporte público rodoviário engloba os corredores, com as suas diferentes formas de funcionamento (segregados, reservados, de acesso exclusivo ou partilhados com outros modos, tais como táxis ou bicicletas), cruzamentos, paragens, oficinas e garagens.

A infraestrutura é um elemento fundamental do sistema, sendo a base para a capacidade potencial, a confiabilidade e para a velocidade de circulação. A existência de via pública de acesso exclusivo (ou de corredores dedicados) representa o elemento estrategicamente mais relevante, mais visível e mais caro do sistema.

Um dos grandes desafios do transporte rodoviário consiste na maximização da utilização da rodovia por forma a atender às necessidades de todos os utilizadores, para além do transporte público, nomeadamente táxis, bicicletas, cargas e descargas e autocarros de turismo.

No Quadro 10 apresenta-se uma súmula dos aspetos afetados pela presença de corredores dedicados (COST TU0603, 2011).

Quadro 10 – Aspetos afetados pela implantação de vias dedicadas (COST TU0603, 2011)

Tipo de impacte	Aspeto afetado
Interno na rede	Número de passageiros no sistema
	Transferência modal (de automóveis particulares ou de outras linhas de transporte público)
Externos, na cidade	Custos do solo, das habitações e dos serviços
	Acessibilidades
	Imagem da cidade

2.3.2 Tipologia dos corredores

No presente documento a análise dos diferentes tipos de corredores foi baseada na classificação proposta por Vuchic (2007), na qual são definidas as três classes: A, B e C (descritas no Ponto 1), de acordo com o grau de separação do corredor em relação à rodovia onde circulam os outros veículos. Esta classificação pode ser aplicada à totalidade de um itinerário, de um terminal até ao outro, ou apenas a uma secção desse itinerário. Para além disso, estas 3 classes podem ser instaladas e operadas de forma flexível, de forma alternada ou até, em áreas restritas, ser operadas em regime de sentido único.

Segundo Vuchic (2007), um BRT deve ser operado predominantemente em corredores das classes B ou A, não partilhados com outros modos, tais como táxis ou veículos de elevada ocupação (HOVs). Apenas em pequenos trechos é aceite a operação em corredores de Classe C.

A escolha de diferentes tipologias de corredores e das suas várias classes, A, B ou C, é justificável pelo contexto local e pelos problemas de regularidade das carreiras que é necessário assegurar.

Em rotas periféricas é possível ter distâncias entre paragens muito superiores às dos percursos urbanos e conseqüentemente obter velocidades mais elevadas. Nestes casos, a criação de corredores de classe A é bastante facilitada, sendo a solução mais adequada para obter velocidades de trajeto elevadas.

2.3.3 Plena via

2.3.3.1 Aplicação das tipologias de corredores na Europa

Entre 2007 e 2014 foi desenvolvida por 14 países europeus, incluindo Portugal, a ação COST TU0603 (COST TU0603, 2011) que teve como objetivo principal fomentar o aumento da utilização dos transportes públicos através de uma melhor compreensão do conceito e da aplicação do BRT no Mundo. No âmbito desta ação foi possível constatar o seguinte:

- Um número relevante de corredores da classe C (principalmente laterais) nos locais onde o espaço é limitado ou onde se perseguiu um objetivo de maximização do uso de estradas existentes com base num orçamento reduzido. Esta classe de corredores foi adotada em Dublin, Manchester e Grenoble.
- Um número significativamente superior de corredores da classe B, por exemplo em Kent, Nantes, TVM (Paris), Zuidtangent (BRT que faz a ligação entre Haarlem, Nieuw-Venep e Amsterdão), Twente, Almere e Hamburgo. A instalação desta classe de corredores em posição central aparenta ser bastante mais eficiente do que localizações alternativas, pois minora os conflitos associados a movimentos de viragens. Observou-se também a implantação desta classe de corredores em posição central com infraestrutura dotada de pavimento com superfície cromaticamente contrastada, como é o caso do sistema *TEOR – Transport Est-Ouest Rouen*, em Rouen.
- Um número pequeno de corredores da classe A. São exemplos desta classe: a secção principal (trunk section) de Oberhausen, onde o BRT tem o uso exclusivo de quatro obras-de-arte; em Zuidtangent (Amsterdão) onde os veículos circulam em exclusivo em diversas obras-de-arte e num túnel; e em Cambridge (*Cambridgeshire Guided Busway*), que tem um corredor dedicado ao longo de uma linha de caminho-de-ferro desativada.

De acordo com as conclusões da Ação COST TU0603 (2011), a percentagem de comprimento dos corredores que é dedicada exclusivamente aos sistemas BRT (classes A e B) nos sistemas existentes é muito variável. Por outro lado, o efeito da proporção de corredores dedicados relativamente ao número de passageiros transportados aparenta ser diminuto, conforme ilustrado na Figura 15.

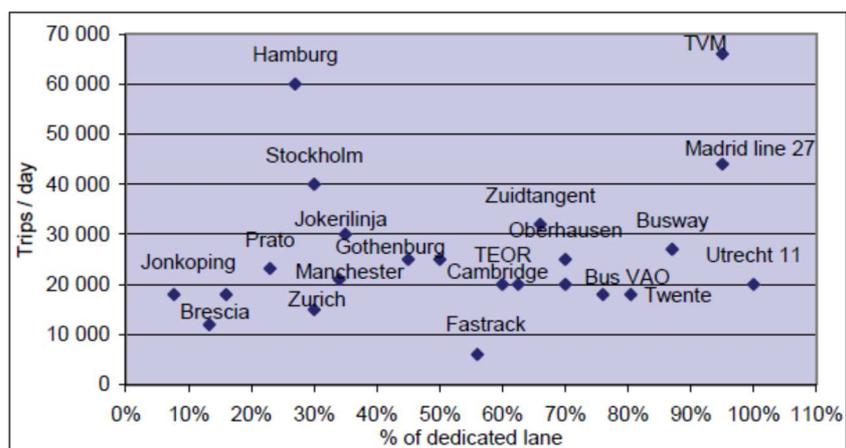


Figura 15 – Número de passageiros transportados e percentagem de corredores dedicados (COST TU0603, 2011)

Embora exista uma relação entre o número de passageiros transportados e a percentagem de extensão sob a forma de corredores dedicados, a mesma não é linear. Sistemas BRT instalados em corredores urbanos consolidados (como acontece em Hamburgo e em Estocolmo) podem ter uma percentagem reduzida de corredores dedicados e ainda assim servirem um número elevado de passageiros. Em

Hamburgo, o investimento na criação de infraestrutura dedicada foi adiado, já que se previa a curto prazo a conversão da linha BRT em metro ligeiro de superfície. Em Estocolmo, as vias dedicadas foram limitadas, dado que o objetivo de retirar uma parte do tráfego rodoviário do centro da cidade foi abandonado. Ambos os exemplos demonstram que eventuais dificuldades na regularidade do serviço podem ser largamente compensadas por um sistema de informação do transporte público em tempo real eficiente e pela elevada frequência do serviço – características existentes em ambos os BRT.

Por outro lado, é possível observar que em duas cidades de pequena dimensão, como Jönköping e Twente, diferentes percentagens de corredores dedicados estão associadas a valores semelhantes de passageiros transportados. Fenómeno idêntico é observado em cidades muito maiores, como Hamburgo e Paris (TVM). Apesar dos contextos locais poderem ditar diferenças, é possível afirmar que, a longo prazo, uma maior percentagem de corredores dedicados conduz a um nível de qualidade mais elevado.

Na Figura 16 é possível observar a ausência de uma relação evidente entre a percentagem de corredores dedicados e a variação no número de passageiros transportados. O caso de TVM (Paris) é excecional. A maior percentagem de incremento no número de passageiros transportados é observada na linha periférica de Jokeri, em Helsínquia, que tem apenas 35% de extensão em corredores dedicados mas dispõe de um elevado número de medidas promotoras da prioridade ao transporte público ao longo de todo o percurso e em todos os principais cruzamentos da linha.

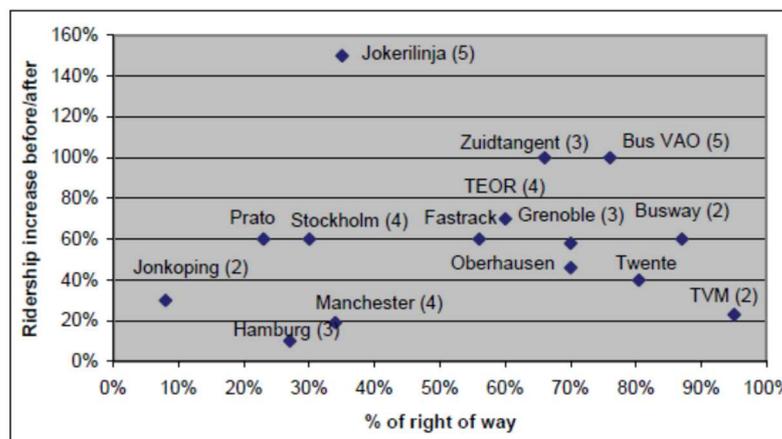


Figura 16 – Variação do número de passageiros transportados e percentagem do corredor dedicado (COST TU0603, 2011)

2.3.3.2 Perfil transversal de corredores BRT

Generalidades

Não existem requisitos fixos relativos à largura do corredor em sistemas BTS ou BRT. São vários os exemplos de sistemas BRT bem-sucedidos construídos em áreas em que a largura total da rua é de apenas 3 metros (como sucede, por exemplo, em parte do centro histórico de Quito, no Equador).

Idealmente, a largura da plataforma deverá contemplar uma paragem no separador central, uma ou duas vias Bus (classes A ou B), duas vias por sentido para o restante tráfego e um espaço adequado para peões e ciclistas (Figura 17). Uma parte dos corredores Ecovía, Trolé e Central Norte, do BRT de Quito, baseiam-se nesta configuração.

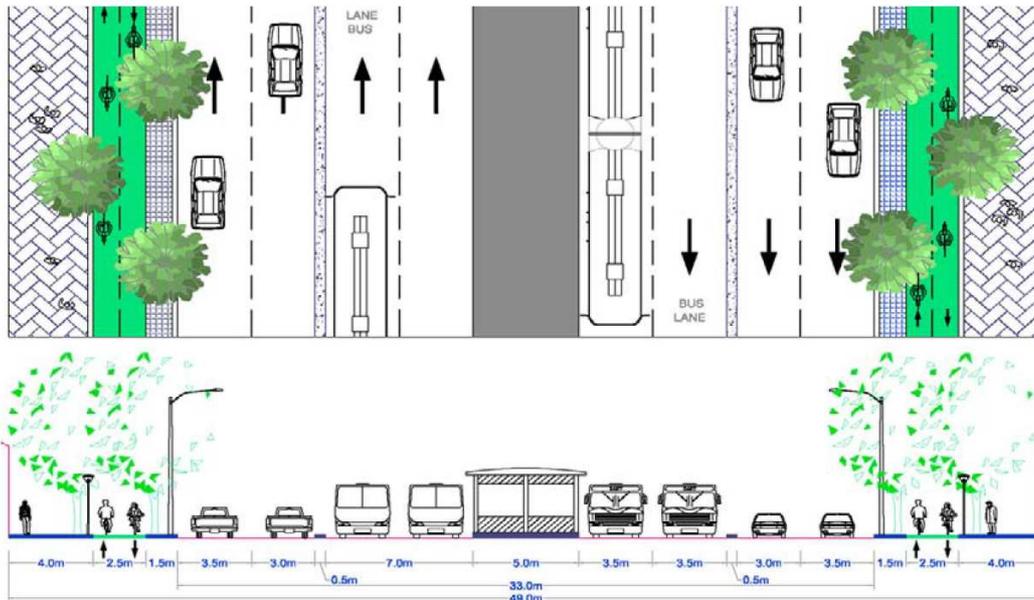


Figura 17 – Configuração típica de corredor BRT (Wright e Hook, 2007)

Na maioria dos países, as larguras normais e mínimas desejáveis das vias nas quais os autocarros *standard* circulam são de 3.5 e 3.0 metros, respetivamente. A operação em vias mais estreitas é possível, ainda que com decréscimos de velocidade e segurança. Estradas de duas vias onde circulem autocarros a velocidades moderadas devem ter uma largura mínima de 7.3 metros. Quando a operação decorre a velocidades elevadas (superiores a 70 km/h) é necessária a introdução de um separador central ou a instalação de uma barreira de segurança, bem como uma largura de 5.5 metros por via para além de bermas esquerda e direita. Para velocidades abaixo de 40 km/h é frequentemente utilizada uma largura total de apenas 6.5 a 7.0 metros para ambas as direções (Vuchic, 2007). As vias de sentido único, como por exemplo, as rampas de acesso a autoestradas, devem ter uma largura de 5.5 metros ou 3.75 metros (caso seja permitida, ou não, a ultrapassagem de veículos imobilizados). No Quadro 11 são apresentados exemplos para a largura das vias em função do limite de velocidade, devendo as mesmas ser adaptadas de acordo com o local em que se inserem.

Quadro 11 – Largura para vias BRT em função do limite de velocidade (COST TU0603, 2011)

Limite de velocidade (km/h)	Sentido único	Dois sentidos
30	3.25 m	6.00 m
50	3.50 m	6.50 m

A existência de duas vias banalizadas (tráfego misto) por sentido facilita significativamente a circulação. Caso, por exemplo, um veículo avarie ou um táxi pare para deixar sair um passageiro, os restantes veículos podem ultrapassar o obstáculo mudando de via.

Em contextos de elevados constrangimentos espaciais, especialmente em centros urbanos antigos com ruas estreitas, verificam-se restrições significativas à implementação de corredores BRT. Nestes casos, torna-se necessária a redução da largura e do número de vias.

O sistema BRT de Rouen, em França, opera numa rua com 14 metros de largura (ver Figura 18). Eventuais avarias de veículos são solucionadas com um lancil galgável entre a via reservada a veículos de transporte público (via Bus) e a via banal. Neste caso, o lancil e a pintura da via impedem o uso não autorizado do espaço do BRT, mas a natureza atravessável do lancil permite que os veículos entrem na via Bus em caso de bloqueio da via banal (corredor de Classe B).



Figura 18 – Corredores BRT em Rouen (Wright e Hook, 2007)

O sistema Metrovía de Guayaquil, no Equador, também utiliza um sistema com apenas uma única via banalizada em alguns trechos na zona central da cidade. Neste caso, a barreira utilizada para separar o corredor BRT é intransponível. O grau de separação física entre vias deve ter em conta aspetos culturais, uma vez que o respeito das regras de utilização da via bus pode depender quase exclusivamente do comportamento dos condutores e motoristas.

Outra opção é fazer a via banalizada suficientemente larga (4.5 metros) para que um veículo consiga efetuar ultrapassagens a baixa velocidade, em caso de emergência. As experiências efetuadas em Guaiaquil, Quito e Rouen demonstram que a existência de ruas estreitas não é um obstáculo intransponível para o desenvolvimento de um sistema BRT. A diminuição do espaço disponível para veículos ligeiros resultante desse desenvolvimento pode, inclusivamente, contribuir favoravelmente para reverter o tráfego de veículos ligeiros induzido (Wright e Hook, 2007).

Restrições à largura de plataforma

As áreas com pequena largura de plataforma, como as zonas centrais das cidades e os centros históricos, apresentam muitos desafios à instalação de sistemas BRT. Estão documentadas (TRB, 2003; Wright e Hook, 2007; Vuchic, 2007) diversas soluções para projetar um sistema BRT para este tipo de locais, nomeadamente: corredor bus central e via única banalizada (*ROW* classe B); áreas de acesso restrito a transporte público (*ROW* classes B ou C); corredores divididos (percursos de sentido único utilizando duas ruas, tipicamente paralelas); instalação no espaço do separador central (*ROW* classe B); alargamento dos eixos viários (*ROW* classe B); separação de nível (*ROW* classe A); operação com guiamento (*ROW* classes A ou B); operação em via única (*ROW* classes A ou B); ou operação em curtos trechos de vias banais (*ROW* classe C).

2.3.3.3 Geometria do traçado

Não há restrições especiais às características do traçado em planta e em perfil longitudinal, no que se refere às rodovias para TP rodoviário, que devem cumprir o estabelecido na Norma de Traçado do IMT (em função da velocidade base pretendida), sendo aplicáveis, também, as recomendações relativamente à coordenação do traçado em planta e em perfil longitudinal e o mencionado em Macedo *et al.* (2010) sobre homogeneidade de traçado.

Relativamente às características da área adjacente à faixa de rodagem, são aplicáveis as recomendações técnicas do InIR (atual IMT) sobre aspetos de segurança rodoviária da área adjacente à faixa de rodagem (Roque e Cardoso, 2011). Igualmente, deverão ser empregues as recomendações relativas a critérios de instalação e seleção de sistemas de retenção rodoviários (Roque e Cardoso, 2010). Na aplicação deste último documento ao contexto de canais de autocarros obriga a adaptações atinentes à tipologia de veículos que circularão nesses canais. Com efeito, as recomendações do InIR (atual IMT) foram elaboradas para estradas correntes, onde o tráfego é eminentemente de veículos ligeiros, suscetíveis de serem contidos por um sistema de retenção N2. Num canal de TP rodoviário o tráfego é exclusivamente de veículos pesados de passageiros, pelo que, sempre que seja necessária a instalação de sistemas de retenção rodoviários, o respetivo nível de retenção deverá ser suficiente para reter esse tipo de veículos.

2.3.3.4 Pavimento

De uma maneira geral, os pavimentos devem proporcionar condições de condução segura e confortável aos condutores e resistir aos esforços verticais e horizontais transmitidos pelos veículos, ao longo do período de vida útil.

A escolha dos materiais constitutivos das vias é determinada pelo peso por eixo e velocidade dos veículos selecionados para a operação, pelo número previsto de veículos que vão usar a infraestrutura ao longo da vida útil projetada para o pavimento e da distribuição lateral das passagens dos rodados dos veículos pesados.

Caso se trate, por exemplo, de veículos articulados *standard* de 18.5 metros ou tróleys, pode ser necessário reconstruir todo o leito de pavimento com materiais capazes de suportar as cargas mais pesadas por eixo, exceto se os volumes de tráfego destes veículos forem muito baixos. Refira-se, como exemplo, o veículo articulado utilizado pelo sistema BRT *TransMilenio* de Bogotá cujo peso total é de, aproximadamente, 30 000 kg e cuja carga máxima por eixo é de aproximadamente 12 500 kg (Wright e Hook, 2007).

A ação do peso do veículo é exercida de forma mais intensa nas áreas das paragens, onde as baixas velocidades e as ações de aceleração e a travagem dos veículos aumentam os esforços sobre o pavimento, podendo dar origem a cavados de rodeira bastante significativos. Esses cavados de rodeira podem tornar a área de embarque da paragem inoperante.

A escolha entre os diferentes tipos de pavimentos depende essencialmente de duas questões fundamentais (Wright e Hook, 2007, COST TU0603, 2011):

- No que se refere ao custo ao longo do ciclo de vida, a tecnologia do betão de cimento é menos dispendiosa em termos de manutenção, embora o investimento de capital seja mais elevado (cerca de 20 a 30%). Os pavimentos rígidos apresentam uma vida útil tipicamente superior à dos pavimentos flexíveis, devido à elevada resistência aos esforços provocados pela passagem frequente de veículos pesados. Assim, a maior vida útil do pavimento rígido pode justificar o custo inicial mais elevado. Os sistemas BRT "Zuidtangent" e "Twente" utilizam este tipo de pavimentos.
- Os principais problemas de deformação diferencial são observados nas paragens, mas também aparecem ao longo da plena via de sistemas guiados ou ao longo de vias estreitas. A tecnologia do betão de cimento fornece uma melhor solução a longo prazo, sendo amplamente utilizada no norte da Europa (Suécia, Reino Unido, Holanda e Alemanha) e na Suíça. A tecnologia das misturas betuminosas é geralmente utilizada em plena via, quando a largura das vias é adequada. A conservação destes pavimentos pode perturbar a qualidade do sistema em termos de acessibilidade e conforto. Em contrapartida, a necessidade de realizar operações de grande manutenção em períodos noturnos (para não afetar a operacionalidade em horas de operação) determina que os custos dessas ações sejam superiores ao habitualmente orçamentado para obras diurnas. Devido ao esforço trator adicional nas paragens, uma solução de compromisso pode consistir na construção de pavimentos rígidos apenas nas imediações das mesmas, sendo as rodovias entre paragens construídas com pavimento flexível.

Podem ser usados outros materiais de construção na pavimentação das vias, apesar de tendencialmente serem mais caros. Particularmente, no centro de cidades, são frequentemente utilizados paralelepípedos e outras pedras para calçamento por razões estéticas (Wright e Hook, 2007). Uma vantagem adicional decorre do aspeto destes materiais de pavimentação corresponder a um

estímulo visual distintivo para os motoristas dos autocarros, indicando-lhes que se encontram num espaço público diferenciado e que devem circular a velocidades baixas.

Alguns destes materiais alternativos estão aptos a suportar elevadas cargas por eixo, desde que bem construídos e que a respetiva conservação seja feita regularmente. Por exemplo, no sistema BRT *TransMilenio* de Bogotá todo o corredor foi repavimentado em betão de cimento, com exceção do centro da cidade, onde se usaram paralelepípedos. Já no sistema BRT TransJakarta, inicialmente, foram usadas apenas misturas betuminosas; no entanto, no período de operação a superfície do pavimento sofreu deformações acentuadas (cavados de rodeira) quer em plena via quer nas paragens, pelo que o pavimento nas paragens foi substituído por betão de cimento.

Nos dois corredores iniciais do sistema BRT de Quito, no Equador, foram utilizadas misturas betuminosas na plena via e betão de cimento nas áreas das paragens. No entanto, o mais recente corredor a ser construído em Quito, o corredor Central Norte, foi já construído em betão de cimento ao longo de toda a sua extensão. Neste corredor é possível constatar uma menor qualidade da infraestrutura das paragens comparativamente às dos outros dois corredores existentes. Tal facto pode ser explicado pelo maior investimento em material de pavimentação para a linha Central e insuficiente atualização da estimativa inicial de custos do projeto.

Genericamente, é recomendável que seja construído um único tipo de pavimento ao longo do percurso de uma carreira de autocarros, para garantir a conveniente criação de expectativas *ad hoc* dos condutores acerca da resistência à derrapagem e para evitar zonas de transição. Estas transições originam acréscimos na carga mental de condução, quando correspondendo a camadas de desgaste oticamente diferentes, e são suscetíveis ao desenvolvimento de ressaltos se corresponderem a pavimentos estruturalmente diversos. No entanto, em carreiras específicas pode ser vantajoso assinalar mudanças, na envolvente rodoviária e no comportamento de condução desejado, através da alteração do tipo de pavimento.

Salienta-se que a pequena largura dos corredores destinados à circulação de autocarros (em especial quando separados fisicamente do resto da rede rodoviária) origina uma maior sobreposição das trajetórias dos autocarros. Esta distribuição transversal da passagem dos rodados mais fechada (ver Figura 19) deve ser convenientemente atendida na fase de dimensionamento dos pavimentos, em secção corrente e nas paragens.

Nos sistemas com guiamento manual dos autocarros são admissíveis requisitos de regularidade da superfície dos pavimentos normalmente exigidas por efeito de conforto dos utentes e de condução: os valores do *International Roughness Index* (IRI) devem ser compatíveis com a classificação de bom e os do cavado de rodeiras devem ser pequenos (Schmidt *et al.*, 2000).

Exigências especiais para sistemas com guiamento automático.

No caso de serem usados veículos com guiamento automático, é previsível que os fabricantes de sistemas de guiamento automático venham a definir requisitos quanto às características superficiais dos pavimentos (designadamente irregularidades longitudinal e transversal), em função do grau de suscetibilidade do funcionamento dos seus sistemas a essas características. Tal facto já se verifica,

por exemplo, no transporte aéreo, no qual os fabricantes de aviões definem curvas de aceitabilidade das irregularidades da superfície dos pavimentos das pistas de aterragem e de *taxi-way* em função da altura e do comprimento das irregularidades, podendo, inclusive, essas curvas ser definidas para cada tipo de aeronave.

Os sistemas de guiamento mecânico têm especificações próprias de exatidão no traçado das linhas e de tolerâncias na irregularidade das superfícies dos pavimentos.

No caso de sistemas automáticos eletrónicos, o fabricante do sistema de GAO tem exigências estritas quanto ao rigor exigido na colocação das marcas de alinhamento (da ordem do milímetro) e no desempenho da superfície do pavimento e à grande estabilidade no tempo desse desempenho. Com efeito, no caso de GAO, as características exigidas não se limitam a garantir o conforto dos ocupantes, decorrendo da necessidade de constância geométrica das marcas de alinhamento e da sua representação nos registos videográficos que o sensor óptico vai obtendo ao longo do percurso. Todos estes aspetos concorrem para a possibilidade de identificação correta dos elementos da geometria do traçado em planta (alinhamento reto, curva circular ou clotóide de concordância), condição imprescindível para que o sistema de guiamento automático funcione em modo assistido. Com efeito, são nocivas do funcionamento do GAO as deformações da superfície do pavimento que alterem a geometria das marcas (designadamente por fluência) bem como as que originem vibrações no veículo (inclinação ou rolamento) suscetíveis de alterar a nitidez das imagens captadas ou a projeção das marcas no sensor de captação de imagem.

Assim, as condições de funcionamento do GAO obrigam a critérios estritos de limitação superior da irregularidade longitudinal e da transversal.

Salienta-se que tais exigências se colocam num quadro operacional desfavorável em termos de impacte da passagem dos rodados dos autocarros. Efetivamente, com um sistema de GAO é previsível que a frequência de passagens dos rodados dos autocarros do SMM tenha uma distribuição transversal muito fechada, atendendo à elevada repetibilidade das trajetórias seguidas eletronicamente. Como já referido, situação semelhante acontece (ainda que em menor grau) nos corredores de circulação muito estreitos, onde a liberdade de escolha da localização transversal das trajetórias é muito pequena. Assim, ao longo da vida da obra é normal que as passagens de eixos se concentrem sobre os alinhamentos distanciados de meia largura de eixos da diretriz da trajetória marcada, originando um acréscimo de dano relativamente ao que seria produzido com uma distribuição transversal habitual desses eixos (ver Figura 19).

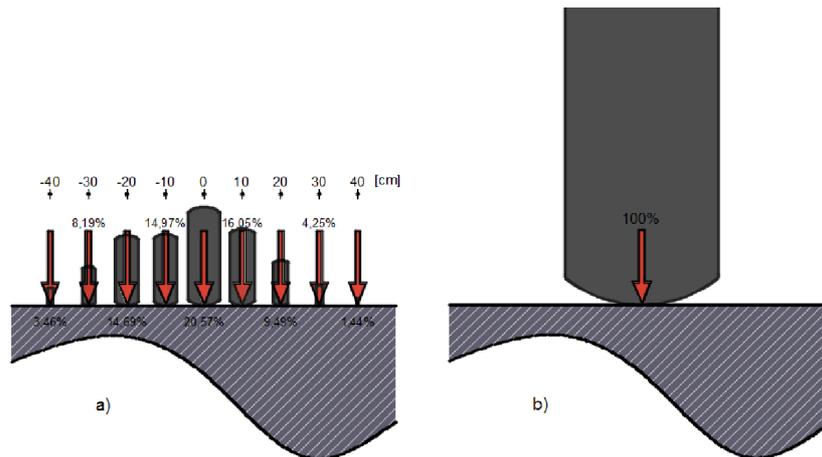


Figura 19 – Efeito da distribuição transversal da passagem dos rodados dos veículos pesados na transmissão das cargas ao pavimento: a) com dispersão transversal; b) sem dispersão transversal (Fonte: Domingos, 2016)

Em estudo realizado no LNEC, Domingos (2016) calculou o acréscimo de dano para diversas patologias (por exemplo, o fendilhamento na base das camadas betuminosas e as deformações permanentes no topo do solo de fundação), tendo obtido rácios entre o dano sem dispersão transversal e o dano com dispersão transversal oscilando entre 1.29 e 5.28, para rodados simples e rodados duplos de vários tipos de veículos pesados.

Atendendo às exigências quanto às características superficiais do pavimento, para garantir que o GAO conhecido funcione ao longo da vida da obra considera-se recomendável a construção de um pavimento de betão de cimento ou de outro tipo que assegure idêntica estabilidade geométrica ao longo da vida útil, sem necessidade de frequentes intervenções de manutenção ou conservação, para correção de deformações superficiais. De acordo com Schmidt *et al.* (2000), valores do *International Roughness Index* (IRI) inferiores a 1,0 m/km são considerados bons, correspondendo-lhes uma descrição verbal de “confortável acima de 120 km/h”, segundo a norma E1926. Para os mesmos autores (Schmidt *et al.*, 2000) cavados de rodeira inferiores a 10 mm podem ser considerados pequenos.

2.3.3.5 Separação das vias

Em grande parte dos casos, os corredores dos sistemas BRT são fisicamente separados do restante tráfego através de uma barreira física. Essa barreira pode ser um separador ajardinado, um lancil, uma guia, um muro ou outros tipos de dispositivos de barreira. O dimensionamento do separador deve desencorajar fisicamente os veículos do restante tráfego de entrar na via Bus.

Um muro ou um grande separador central ajardinado oferecem a proteção mais completa para qualquer via Bus mas dificultam a saída de veículos da via Bus em caso de obstrução da mesma. De igual forma, grades metálicas, como as utilizadas em Pequim, tornam impossível a saída dos veículos do corredor em caso de emergência. Por outro lado, um gradeamento do tipo usado naquela cidade tem a vantagem de ser amovível, permitindo o seu reposicionamento num futuro alargamento do corredor.

O separador pode ser dimensionado para permitir que os autocarros possam sair do corredor, para contornar uma obstrução, devendo ser suficientemente alto para dissuadir os condutores de automóveis de entrar no corredor, mas suficientemente baixo para permitir que os autocarros saiam de forma segura (tal como acontece em Bogotá, ver Figura 20⁶). Para esse efeito é possível adotar um perfil galgável no lado da via Bus e um perfil não galgável no lado dos automóveis. Esta configuração é facilitada pela diferença de raios correntes entre os pneus dos autocarros e os veículos ligeiros de passageiros. Igualmente, é importante garantir que a configuração não galgável seja concebida de modo a não agravar as consequências de despistes de motociclistas ou de ciclistas.

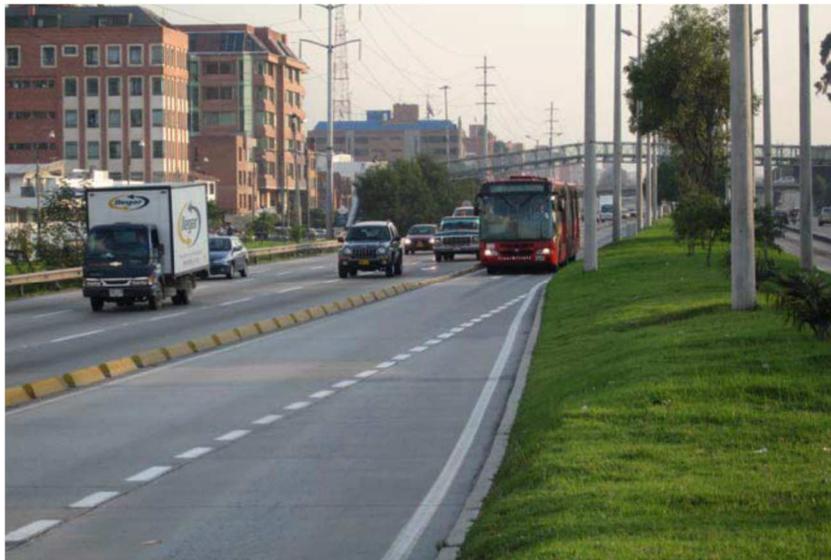


Figura 20 – Lancil de proteção do corredor em Bogotá (Wright e Hook, 2007)

A segurança dos peões e ciclistas bem como considerações de estética são outros aspetos a ter em conta. Se o espaço disponível o permitir, há várias vantagens na construção de um separador central para segregar a via Bus das vias do restante tráfego. Um separador central de um metro de largura já permite que o mesmo sirva como refúgio para os peões que atravessam o corredor; um corredor com dois metros de largura já pode servir de refúgio para atravessamento de ciclistas. Separadores mais largos permitem melhor demarcação da via Bus, sendo também esteticamente mais agradáveis (Wright e Hook, 2007).

Em Curitiba o sistema BRT está segregado do restante tráfego mediante um ilhéu separador com pavimento em calçada portuguesa, que também serve de refúgio para os peões (ver Figura 21). O ilhéu facilita o cruzamento das faixas de rodagem por peões, em qualquer ponto do corredor. Em determinados locais, o estacionamento de automóveis é feito junto ao ilhéu, em vez de junto ao passeio.

⁶ É de assinalar que na solução mostrada as aberturas no lancil, destinadas à drenagem superficial do pavimento, constituem elementos perigosos para motociclistas e ciclistas em caso de queda, pelo que são desaconselhadas.

Desta forma, a área de estacionamento faz parte da barreira de proteção que garante a integridade da via Bus.



Figura 21 – Ilhéu separador em Curitiba (Wright e Hook, 2007)

Em São Paulo, no corredor Santo Amaro/Nove de Julho, foram inicialmente instalados muros com o objetivo de garantir eficácia na proteção do acesso ao corredor. Com estes muros pretendia-se impedir o atravessamento da via Bus por parte de peões, fora das zonas de atravessamento. Contudo, esta solução revelou-se visualmente desagradável, para além de originar o bloqueio do corredor, em caso de veículo avariado. Outrossim, os muros impediam a necessária visibilidade no atravessamento de peões. Por estas razões, os muros foram retirados, o que melhorou significativamente a qualidade do espaço urbano, mas também aumentou significativamente o número de intrusões de automóveis ligeiros na via Bus.

Em zonas com elevado número de peões, a instalação de um separador central depende do volume de veículos e de peões. Em alguns casos bem-sucedidos, foram criadas zonas pedonais sem separação evidente entre a via Bus e a zona pedonal. Nestes casos, foram impostos limites de velocidade máxima baixos para permitir a reação atempada dos motoristas a qualquer peão que invada a via Bus. Por exemplo, ao longo da linha da Alameda Jimenez, em Bogotá, foram instalados pilaretes para separar a via Bus da zona pedonal. A configuração evidenciada na referida figura tem a desvantagem de materializar diversos obstáculos perigosos para ciclistas, em caso de queda ou colisão; por outro lado, nos períodos de baixa frequência de serviço de autocarros não é evidente qual o espaço alocado aos utentes vulneráveis e o reservado aos autocarros, com consequências desfavoráveis quer para o nível de segurança rodoviária quer para a regularidade e pontualidade do serviço de TPR.

2.3.3.6 Restrições de acesso às vias bus

A confiabilidade do serviço de TPR depende das condições de escoamento do tráfego, não sendo possível garantir a pontualidade ou regularidade do serviço quando o TPR está sujeito aos atrasos impostos pelo congestionamento ou quando automóveis ligeiros invadem as vias Bus.

A invasão de vias Bus por veículos ligeiros tem um impacto muito negativo na velocidade comercial e no desempenho global do transporte público (ver Figura 22). Estes efeitos são evidentes, mesmo quando as vias Bus são apenas pontualmente invadidas pelos referidos automóveis.



Figura 22 – Via Bus no Campo Grande, Lisboa

Há diversos instrumentos que podem ser usados para desencorajar o uso das vias Bus por automóveis:

- separação física;
- marcação longitudinal;
- combinação de marcação rodoviária e de sinalização vertical;
- fiscalização policial;
- cancelas automáticas, longitudinais ou transversais (Figura 23);
- coloração distinta da superfície das vias Bus.



Figura 23 – Esquema de sinalização adotado nas intersecções do corredor de BRT de Kesenuma-Tome (Nagai, 2015)

Na maior parte dos casos é recomendável complementar a delimitação das vias por separadores físicos com a utilização de marcação longitudinal apropriada. Deve ainda ser dada particular atenção à sinalização vertical (ver Figura 24), para que todos os utentes do espaço (condutores, motoristas e peões) possam adequar o seu comportamento à existência destas vias.

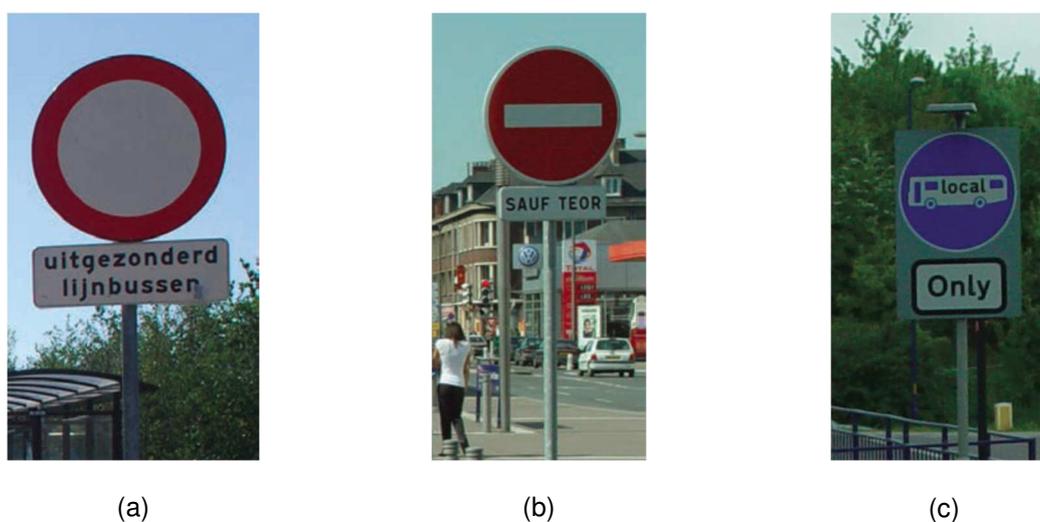


Figura 24 – Sinalização vertical em: (a) Twente; (b) Teor; (c) Kent (COST TU0603, 2011)

Os instrumentos anteriores podem não ser suficientes para impedir violações intencionais da utilização das vias Bus, pelo que a cooperação dos operadores dos serviços de TPR, dos gestores das rodovias e da polícia responsável pela fiscalização do trânsito é igualmente essencial.

A aparência estética das vias tem um forte impacto na imagem pública do sistema de TPR. A cor da superfície da via é uma ferramenta eficaz para criar um ambiente especial e atraente (Figura 25). Vias Bus pintadas de cor atraente não só melhoram a imagem do sistema, como criam uma sensação de perenidade do sistema. Esta forma de evidenciar as vias contribui para evitar que os condutores de

veículos ligeiros bloqueiem as vias quando esta se cruza com as vias banalizadas (Wright and Hook, 2007).



(a)



(b)

Figura 25 – Pintura dos corredores: (a) Nagoya; (b) Rouen (Wright and Hook, 2007, COST TU0603, 2011)

A escolha de cor é função de preferências e condições locais. Um sistema de cores por toda a cidade pode ser um mecanismo para diferenciar as diferentes funções da infraestrutura. Por exemplo, pode ser útil usar uma cor para as vias Bus que seja diferente das cores utilizadas nas ciclovias da cidade. De forma geral, devem ser usados tons mais escuros, em vez de cores claras, devido aos rastros de pneus que, a longo prazo, irão marcar estas vias (Wright and Hook, 2007). Em diversos sistemas europeus de BRT as vias Bus foram pintadas de cor específica, tais como Rouen, Castellón, Paris e a generalidade dos sistemas existentes no Reino Unido (COST TU0603, 2011).

2.3.4 Intersecções

As intersecções são elementos críticos para a velocidade de operação e a confiabilidade do sistema de TPR, dado o elevado número de pontos de conflito e as interações entre veículos e entre veículos e peões que aí existem (Vuchic, 2007). Uma intersecção mal concebida, ou cuja regulação por sinais luminosos esteja mal dimensionada, pode reduzir substancialmente a capacidade do sistema de TPR. Concomitantemente, encontrar soluções para otimizar o desempenho de uma intersecção pode contribuir significativamente para a melhoria da eficiência do sistema.

Nas intersecções, uma classe de corredor adequada permite velocidades de operação mais elevadas, em particular nas horas de ponta. Da mesma forma, obter-se-á uma maior regularidade ao longo do dia (com tempos de percurso muito mais estáveis), permitindo assim obter uma maior frequência e capacidade nas referidas horas de ponta.

Deste modo, um princípio básico nestas zonas é o da prioridade ao TPR, sempre que as condições locais o permitam. Nos cruzamentos prioritários, as ruas onde o TPR não circula devem ter sinalização vertical de perda de prioridade ou, quando justificado por razões de distâncias de visibilidade, “stop”. Nos cruzamentos com regulação por sinais luminosos, o esquema das fases dos ciclos de sinais deve

minimizar os atrasos na rua em que circula o transporte público, em detrimento da rua que atravessa esse eixo (Vuchic, 2007). Em diversos casos poder-se-á tirar partido das potencialidades dos sistemas de ITS, para permitir aos condutores dos autocarros o acionamento do sinal verde à aproximação das intersecções.

As rotundas apresentam, neste aspeto, três desvantagens: em regime normal, os veículos que circulam no anel têm prioridade, a entrada é mais difícil para veículos longos do que para automóveis ligeiros e o nível de conforto para os passageiros do transporte público é reduzido.

Por estas razões, é possível observar diversas rotundas (novas ou remodeladas) onde foram executados atravessamentos diretos em linha reta (*“straight crossing”*) para o transporte público. Nestas rotundas, o restante tráfego perde a prioridade dentro do anel, situação que pode ser verificada em cidades europeias como Nantes, Lorient, Jönköping e Gotemburgo. Em Lorient (França) existe um conjunto de rotundas de pequena dimensão atravessadas na ilha central, onde a velocidade é limitada a 30 km/h (ver Figura 26). Nestas rotundas não há semáforos devido ao fluxo irregular de autocarros. No caso das rotundas de grandes dimensões, existem desvantagens ao nível da segurança rodoviária, uma vez que nestas as velocidades praticadas pelos veículos ligeiros no anel central são, normalmente, mais elevadas do que nas rotundas pequenas. Em ambos os casos a sinalização da cedência de passagem pelos veículos circulando no anel central constitui um desafio, em termos de normalização, de eficácia e de segurança rodoviária.



Figura 26 – Rotunda em Lorient (COST TU0603, 2011)

Ao nível nacional, e apesar de se tratar de um sistema de elétrico (LRT), é de destacar o caso particular da Estação Nau Vitória na linha de Gondomar do Metro do Porto. Esta estação encontra-se encaixada no interior de uma rotunda desnivelada, tendo a estação uma configuração que se assemelha a uma arena de forma elíptica (Figura 27). No caso em apreço são de realçar as deficientes condições de visibilidade no interior do anel de circulação e numa das aproximações.



Figura 27 – Estação Nau Vitória, Porto (<http://www.openhouseporto.com/places/estacao-de-metro-nau-vitoria/>,
acedido em 30.12.2016)

Em intersecções semaforizadas, a existência de corredores reservados a veículos de TPR permite dar um tratamento preferencial (parcial ou total) aos autocarros, nomeadamente através do prolongamento do tempo de verde na fase correspondente (no início ou no final da fase), da criação de uma fase específica para os autocarros ou pela prioridade absoluta no caso da presença de um autocarro na intersecção (*full override*). Esta intervenção específica em intersecções permite reduzir o tempo perdido pelos autocarros no atravessamento das mesmas, bem como autorizar mudanças de direção proibidas para os restantes veículos (por exemplo, viragens à esquerda) (Vuchic, 2007).

A aplicação destas técnicas pode afetar negativamente a segurança rodoviária do atravessamento de peões (designadamente no caso da fase específica para autocarros, que pode violar a expectativa dos peões, confrontados com filas de veículos ligeiros parados), pelo que este aspeto deve ser cuidadosamente acompanhado.

Os benefícios do tratamento preferencial dado a autocarros em intersecções podem ser maximizados através da introdução de sinalização semafórica específica – conforme exemplo na Figura 28– não aplicável aos restantes veículos (para evitar qualquer equívoco com a semaforização convencional, são normalmente utilizados semáforos reservados para elétricos, com uma linha branca vertical ou horizontal, para as instruções “avançar” ou “parar”, respetivamente). Em França, estes sinais só podem ser dirigidos a autocarros e elétricos, pelo que os corredores dedicados onde esses sinais estejam instalados não podem ser partilhados com bicicletas ou táxis (COST TU0603, 2011).



Figura 28 – Sinalização semafórica específica para autocarros e elétricos (COST TU0603, 2011)

O acionamento dos sinais reservados a veículos de TPR pode ser feito através de um sinal rádio emitido a partir do autocarro ou através de espiras indutivas (*loops*) instaladas no pavimento. É de referir que os sistemas de deteção e de identificação de autocarros usam cada vez mais tecnologia de sistemas de posicionamento global (GPS), mesmo quando estes circulam em vias banalizadas (Vuchic, 2007).

O funcionamento das vias reservadas a veículos de TPR (vias Bus) convencionais apresenta frequentemente problemas originados por movimentos de viragem nas intersecções. Quando estas vias incluem um lancil, as viragens à esquerda feitas por autocarros e as viragens à direita executadas por outros veículos criam zonas de entrecruzamento. A mesma situação ocorre com viragens à esquerda por parte do restante tráfego e viragens à direita feitas por autocarros em vias Bus centrais. Podem ser implementadas diferentes soluções para mitigar este problema, nomeadamente através da permissão de utilização da via Bus, na aproximação à intersecção, por parte dos veículos ligeiros que pretendam virar à direita, tal como existe em Lisboa. Esta solução só é viável se o volume de viragens for pequeno e se estas viragens forem executadas rapidamente (ou seja, com raras cedências de passagem a peões no início da via intersectada de desvio). É de referir que em intersecções onde os autocarros façam curvas à direita, o raio das curvas deve ser desejavelmente superior a 10 metros e nunca inferior a sete metros (Vuchic, 2007).

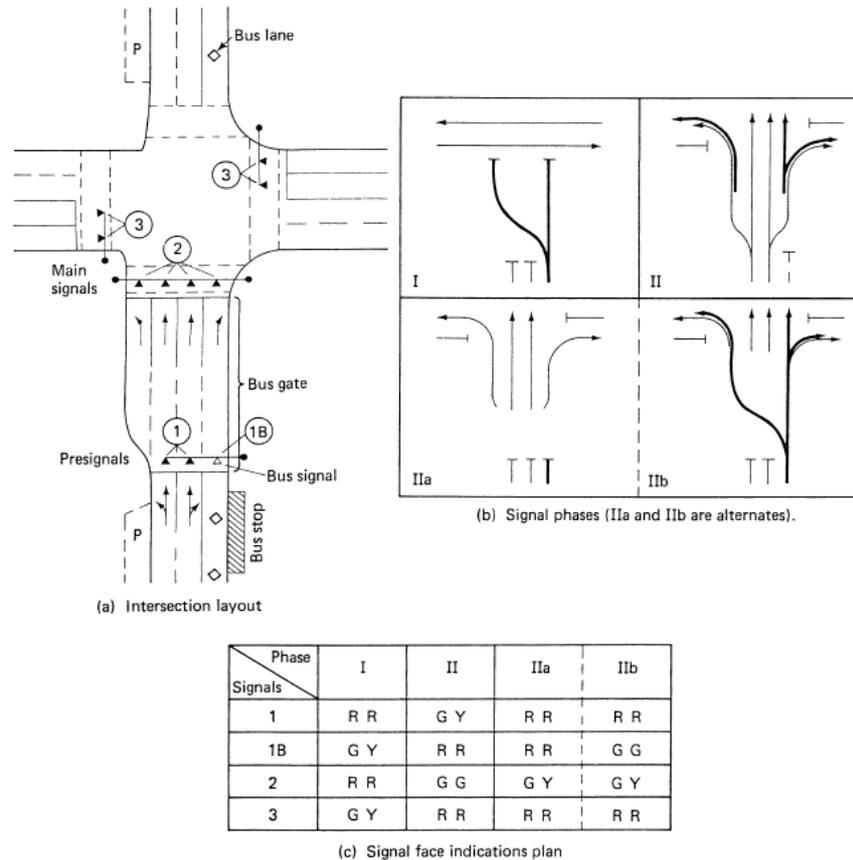


Figura 29 – Sistema de geometria da intersecção e de semaforização designado “bus gate” (Vuchic, 2007)

De acordo com Vuchic (2007), independentemente do volume de tráfego, a melhor solução para todos os movimentos de viragem é dada por um sistema de geometria da intersecção e de semaforização designado “bus gate”, ilustrado na Figura 29. Esta solução tem sido usada em Wiesbaden e em algumas outras cidades alemãs desde há muitos anos.

O exemplo da Figura 29 ilustra uma intersecção entre uma rua de sentido único e uma rua com dois sentidos, onde um conjunto de semáforos, designados como pré-semaforização (com o número 1 na Figura 29), está localizado a montante da semaforização principal da intersecção (2) na rua com via Bus, formando um “bus gate”. O comprimento do “bus gate” é de cerca de 30 a 40 m, dependendo do número de vias e da manobrabilidade dos autocarros. As fases dos semáforos 1 são avançadas vários segundos em relação aos semáforos 2, de modo a que a área do “bus gate” seja esvaziada durante a fase IIa, antes de passar a vermelho (I na figura). Durante a fase I, o semáforo da via Bus (1B) passa a verde, permitindo que os autocarros prossigam a partir da pré-semaforização até aos sinais 2 para qualquer uma das vias existentes. A fase II começa por mudar o semáforo 1B para vermelho, o 1 para verde, e alguns segundos depois, o 2 para verde. Os autocarros são assim os primeiros veículos a entrar na intersecção. Todos os veículos podem fazer movimentos de viragem sem serem cruzadas zonas de entrecruzamento com o restante tráfego. Este esquema de fases (I, II e IIa) não afeta a capacidade das vias convencionais, uma vez que os seus tempos verdes permanecem os mesmos e

a progressão total (*full progression*) é garantida pelos sinais 1 e 2. Os autocarros têm movimentos de viragem protegidos e posicionam-se à frente do restante tráfego. A principal desvantagem desta solução prende-se com o facto de os autocarros que cheguem à pré-semaforização durante a fase II terem de esperar até ao início da fase II seguinte para atravessar a intersecção, sofrendo assim um atraso superior à duração da fase I.

Uma pequena variação na temporização dos semáforos pode eliminar este atraso para alguns autocarros através de uma ligeira redução do tempo de verde para o restante tráfego. Esta temporização alternativa, ilustrada na Figura 29 como fase IIb, representa uma sobreposição das fases I e II: à medida que os semáforos 1 ficam vermelhos, o semáforo 1B fica verde e os semáforos 2 permanecem verdes durante mais alguns segundos do que o necessário para esvaziar a área do “*bus gate*”. Assim, um ou dois autocarros que cheguem ao semáforo 1B durante a fase II podem passar pela intersecção antes da fase I, com os movimentos de viragem completamente protegidos.

As fases de semaforização I, II, IIb representam a melhor solução sempre que o volume de autocarros seja significativo e, simultaneamente, seja possível retirar 5 a 8 segundos às outras vias sem deteriorar excessivamente o nível de serviço da intersecção. Uma solução ainda melhor pode ser materializada se os autocarros estiverem equipados com dispositivos de acionamento dos semáforos. Nesses casos, a operação normal de semaforização decorrerá com a fase IIa mas para os autocarros que se aproximam durante a fase II pode ser atuada, em alternativa, a fase IIb.

No centro das cidades, é comum existirem intersecções para onde convergem várias linhas de transporte público. Geralmente são intersecções com reduzidos volumes de tráfego motorizado e baixas velocidades mas com elevada procura por parte dos modos ativos (peões e ciclistas). De acordo com o verificado no COST TU0603 (2011), nestes casos a melhor solução corresponde, muitas vezes, a gerir o tráfego sem recurso a semáforos. No exemplo da Figura 30 é possível observar um elemento da polícia a ordenar e controlar o tráfego, em hora de ponta, na cidade de Zurique. Na Figura 31 é possível observar a zona da interface do Campo Grande, em Lisboa, no interior da qual também não existem semáforos.



Figura 30 – Zona central de Zurique (COST TU0603, 2011)



Figura 31 – Estação do Campo Grande, em Lisboa

2.3.5 Paragens

Uma das primeiras tarefas a desenvolver na conceção de sistemas de TPR (incluindo BRT) é a criação de uma rede que sirva eficazmente os seus passageiros, dando particular atenção à localização das paragens, de modo a que estas sejam facilmente acessíveis. Sem esta condição estar garantida, todo o esforço colocado na prossecução das tarefas subsequentes de organização do sistema pode ser desperdiçado, já que a rede concebida não tem condições de base para prestar o serviço que deveria assegurar.

Assim, as paragens constituem um elemento fundamental do sistema de TPR, pois é a partir delas que os passageiros têm acesso ao sistema de transportes, não podendo ser ignorada a sua integração no espaço urbano.

Nos sistemas BRT, uma paragem não corresponde a um local (volátil) onde os autocarros param e que pode ser facilmente deslocada por qualquer motivo (por exemplo, para trabalhos nas redes subterrâneas de águas, gás, etc.). Uma paragem é construída como instalação perene, para aí permanecer e estruturar o espaço envolvente (COST TU0603, 2011). Assim, as paragens devem ter um aspeto distinto e identificável com os veículos BRT para promover uma identidade da marca BRT (Wirasinghe *et al.* 2013). Por exemplo, em Curitiba, as paragens são em forma de tubo e transparentes, feitas de vidro e aço, com capacidade para acomodar um autocarro cheio de passageiros.

Um fator fundamental a ter em consideração, pela relevância financeira para o projeto, é a distância entre paragens. Na Figura 32 é possível observar a correlação entre a referida distância e a velocidade de circulação do TPR.

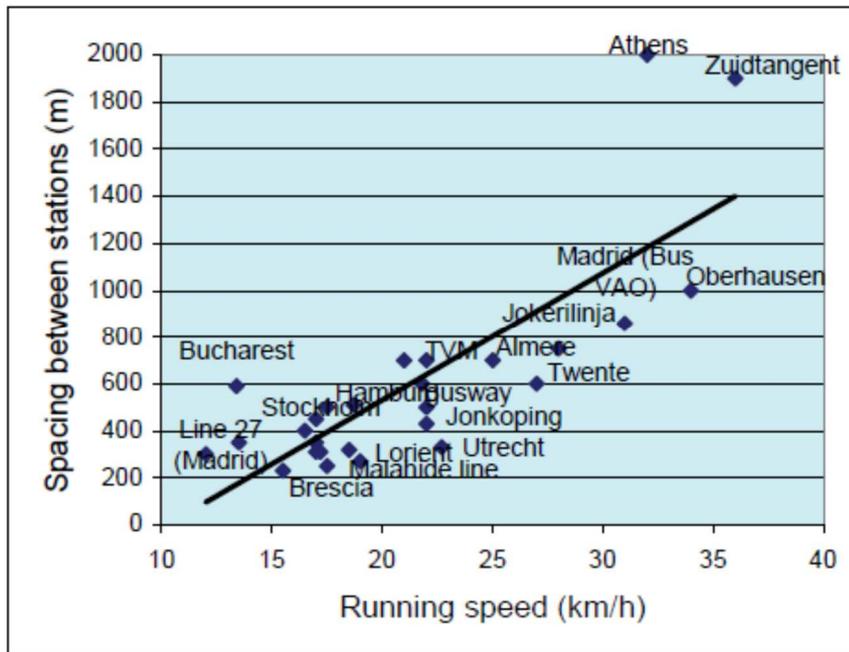


Figura 32 – Distância entre paragens e velocidade de circulação (COST TU0603, 2011)

No âmbito da ação COST TU0603 (COST TU0603, 2011) foi possível observar o seguinte:

- Em sistemas BRT é necessário garantir um espaçamento mínimo entre paragens de 400 a 500 m. Por exemplo, em Estocolmo, o espaçamento médio entre paragens passou de 200 m para 450 m, para aumentar a velocidade de circulação.
- O espaçamento varia muito das áreas centrais para as zonas periféricas. Por exemplo, em Cambridge, o espaçamento varia entre 400 m nas secções urbanas e 2500 m nas ligações entre aglomerados urbanos.
- Os menores espaçamentos entre paragens foram observados em Madrid (300 m), Utrecht (350 m), Lorient (270 m) e Dublin (250 m).
- Ao aumento da distância entre paragens corresponde um aumento das distâncias percorridas a pé pelos utilizadores do transporte público, o que se veio a revelar um problema para idosos e para pessoas com mobilidade reduzida.
- À diminuição do espaçamento entre paragens está associada menor velocidade de circulação.

Tendo por base os dados compilados por Wright e Hook (2007) relativos a 44 sistemas de BRT em todo o mundo, Hensher e Golob (2008) desenvolveram uma base de dados para avaliar a relação entre o custo da infraestrutura (em USD totais e por quilómetro), a capacidade de transporte (em passageiros por hora por direção) e as especificações de cada sistema, que incluem, entre outras, a frequência de serviço, o sistema de tarifário, a velocidade e o espaçamento entre paragens (de acordo com o descrito na Figura 33).

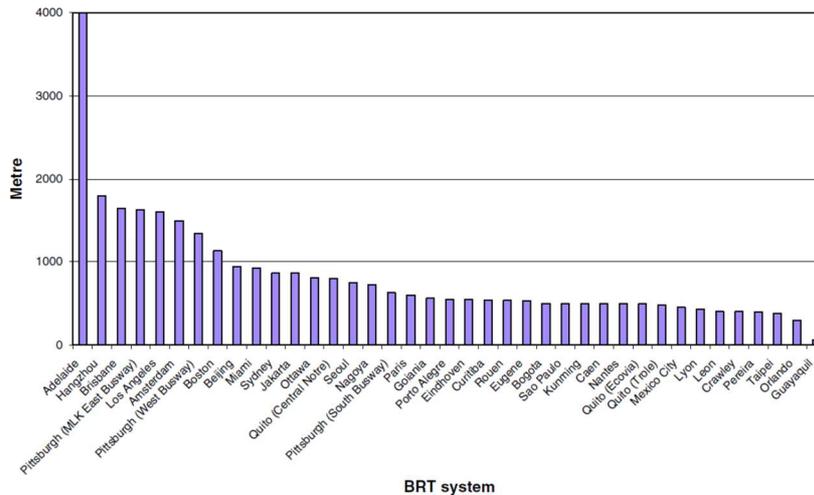


Figura 33 – Distância média entre paragens (2006) (Hensher e Golob, 2008)

As paragens de BRT são geralmente constituídas por três elementos principais: sub-paragens (*substops*) ou plataformas; áreas de transição; e infraestrutura de integração, tais como passagens de peões, espaços para vendedores, estacionamento de bicicletas ou equipamentos para apoio a outras atividades comerciais (Wright e Hook, 2007).

O espaço destinado às paragens deve ser apropriado para que os passageiros possam aguardar pelo transporte e permitir que a sua entrada e saída nas viaturas se faça com facilidade. Assim, as estações (quer em corredores dedicados, quer em zonas de tráfego misto) necessitam de atravessamentos pedonais seguros, gares para a paragem dos autocarros em número adequado face à procura, entrada direta dos passageiros para os autocarros e plataformas com largura adequada à procura.

O dimensionamento das estações depende do volume de passageiros, da forma de acesso às mesmas e do tipo de bilhética. Em sistemas abertos em que a cobrança das tarifas é feita autonomamente pelo utilizador (*self-service fare collection*), as paragens e estações podem ser separadas por sentido e as áreas de paragem não têm de ser vedadas. Em sistemas com controlo total do pagamento (*full payment control*), ou seja, quando é necessário vedar as plataformas de embarque, o dimensionamento é significativamente mais exigente e requer mais espaço. Nestes casos, o acesso pedonal deve ser canalizado através de um ou dois passeios, desde os cruzamentos ou viadutos mais próximos, até um conjunto de portas de cobrança de tarifas (*fare gates*). Na maioria dos casos, devem ser utilizadas plataformas elevadas, não só para facilitar o embarque, mas também para evitar o acesso pedonal direto proveniente da rua (Vuchic, 2007).

Sendo a instalação de plataformas elevadas nos dois lados do corredor uma solução com custos elevados e que ocupa bastante espaço, é comum usar-se uma única plataforma central que serve os autocarros em ambas as direções.

Contudo, tais plataformas exigem que os autocarros tenham portas do lado esquerdo (ver Figura 34). Esta configuração é usada, tipicamente, em linhas de BRT em que o embarque/desembarque de passageiros deve ser feito da forma mais eficiente, o que obriga a ter autocarros concebidos especificamente para estas linhas. Assim, é possível minimizar os tempos de paragem, o que possibilita o aumento da frequência e consequente maximização da capacidade da linha (Vuchic, 2007). Alternativamente, nas paragens com este tipo de plataformas pode-se adotar localmente a circulação dos autocarros em contra fluxo.



Figura 34 – Plataforma central no corredor Ecovia em Quito (Wright e Hook, 2007)

Esse tipo de paragem – com portas de cobrança de tarifas e onde o processo de embarque/desembarque é feito através de quatro a oito portas em cada autocarro – é usado, por exemplo, na linha BRT Insurgentes na Cidade do México. Os autocarros articulados param, um de cada vez, e passam por intersecções semaforizadas à razão de um autocarro por ciclo semaforico. Nas intersecções onde são utilizados ciclos semaforicos de 90 segundos, esta operação pode atingir aproximadamente 5 000 pessoas/hora; se cada um dos 40 ciclos por hora for utilizado por um autocarro com uma capacidade de 120 passageiros e assumindo uma ocupação próxima de 100%, resultará uma capacidade da linha de 4 800 pessoas/hora (Vuchic, 2007).

A capacidade da linha pode ser aumentada com a criação de dois locais de embarque ao longo das plataformas da paragem e duas vias por sentido ao longo das áreas da paragem (*station areas*), o que permite a mútua ultrapassagem de autocarros e a partilha da paragem por serviços locais e expressos.

Nas paragens, onde as ultrapassagens e manobras são realizadas de forma rotineira, os corredores BRT podem consistir apenas numa via convencional, com uma secção alargada (que pode ir até 10 m de largura por sentido). Em secções abertas (*open sections*) entre paragens, as faixas de rodagem de

autocarros podem ter uma ou duas vias de largura, por vezes com bermas estreitas. Em termos globais, o corredor pode ter uma largura de 8 a 18 metros. Para reduzir a largura ao longo do corredor é possível que as áreas ocupadas pelas paragens sejam escalonadas por sentido. Nestes casos, haverá uma única via numa direção e duas vias mais a largura da plataforma da paragem na outra, com uma largura total de aproximadamente 12 a 15 m (Vuchic, 2007) (ver Figura 35). Contudo, esta configuração alonga a paragem e também introduz uma curva na área da paragem. Assim, em zonas onde existam restrições de espaço, esta configuração pode permitir vias de ultrapassagem nas paragens (Wright e Hook, 2007).

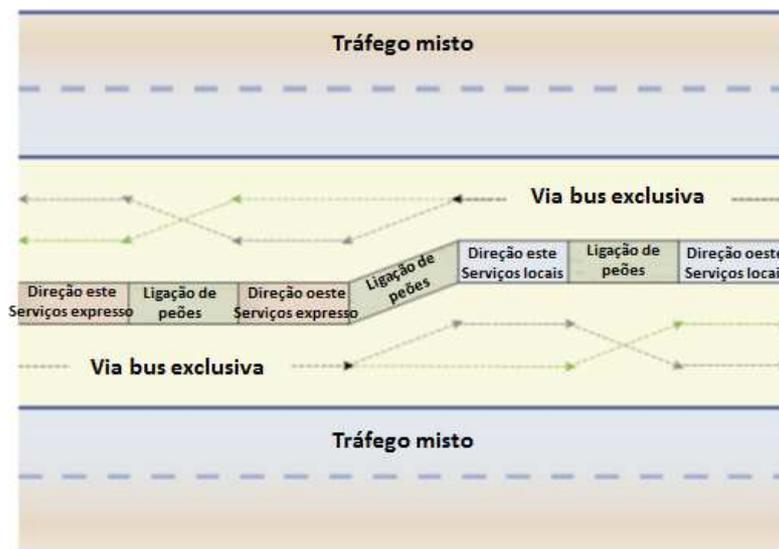


Figura 35 – Escalonamento das paragens por sentido (Wright e Hook, 2007)

A rede pedonal deve ser convenientemente articulada com o sistema BRT, em particular, as paragens devem estar a uma distância de acesso apropriada, sendo removidas todas as barreiras que dificultem a acessibilidade, com particular atenção aos utentes de mobilidade reduzida através da instalação de rampas e elevadores de cadeiras de rodas (Grava, 2003). No sistema BRT TransJakarta as paragens estão ligadas aos passeios através de passagens pedonais superiores e rampas (Ernst, 2005).

As paragens também podem desempenhar um papel fundamental na identificação dos sistemas BRT em que se encontram inseridas. De acordo com o verificado na ação COST TU0603 (COST TU0603, 2011), são consideradas como paragens de referência as existentes em Nantes, Rouen, Paris, Zuidtangent, Kent, Cambridge, Helsínquia, Lorient e Jönköping.

Os maiores sistemas BRT na Europa têm adotado máquinas de venda automática de bilhetes na maioria, ou na totalidade, das paragens (como acontece, por exemplo em Nantes, Zuidtangent ou Rouen). Outros sistemas de menor capacidade adotaram procedimento semelhante, tal como acontece em Kent ou no *Cambridgeshire Guidway Busway* que liga Cambridge, Huntingdon e Saint Ives.

Verificou-se que a venda de bilhetes pelos motoristas não é eficiente, podendo causar atrasos muito significativos nos períodos de ponta. Tal prática pode ainda criar perturbações no acionamento da prioridade em intersecções semaforizadas.

Na Holanda, Suécia e Reino Unido tem sido observada uma forte tendência de "intermodalidade do TPR com o uso de bicicletas" (*"intermodality with cycling"*), pelo que quase todas as paragens têm algum espaço dedicado para "B + R" (*Bike and Ride*).

Referências bibliográficas

- ANDERSON, R., CONDRY, B., FINDLAY, N., BRAGE-ARDAO, R., LI, H., 2013 - **Measuring and Valuing Convenience and Service Quality. A review of global practices and challenges from the public transport sector. Discussion Paper 2013-16.** International Transport Forum, Paris.
- ASVV, 1998 – **Recommendations for traffic provisions in built-up areas.** Centre for Research and Contract Standardization in Civil Engineering, The Netherlands.
- BJÖRKLUND, S., SOOP, C., ROSENQVIST, K., YDSTEDT, A., 2000 – **New Concepts for Trolley Buses in Sweden.** KFB - Swedish Transport and Communications Research Board.
- CARDOSO, J. L. (2010). **Recomendações para definição e sinalização de limites de velocidade máxima.** Prevenção Rodoviária Portuguesa. Lisboa, ISBN978-972-98080-4-3
- CARDOSO, J.L.; ROQUE, C.; MORAIS, P., 2019 – Guiamento automático de autocarros. Impactes nos requisitos aplicáveis à infraestrutura. 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- CEE, 1970 – **Diretiva 70/156/CEE do Conselho**, de 6 de Fevereiro de 1970, relativa à aproximação das legislações dos Estados-Membros respeitantes à receção dos veículos a motor e seus reboques.
- CEE, 1995 – **Diretiva 96/53/CE do Conselho**, de 25 de Julho de 1996, que fixa as dimensões máximas autorizadas no tráfego nacional e internacional e os pesos máximos autorizados no tráfego internacional para certos veículos rodoviários em circulação na Comunidade.
- CEE, 1997 – **Diretiva 97/27/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 22 de Julho de 1997, relativa às massas e dimensões de determinadas categorias de veículos a motor e seus reboques e que altera a Diretiva 70/156/CEE.
- CEE, 2002 – **Diretiva 2002/7/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 18 de Fevereiro de 2002, que altera a Diretiva 96/53/CE do Conselho que fixa as dimensões máximas autorizadas no tráfego nacional e internacional e os pesos máximos autorizados no tráfego internacional para certos veículos rodoviários em circulação na Comunidade.
- CEE, 2005 – **Directiva 2005/55/CE do Parlamento Europeu e do Conselho.**
- CIVITAS, 2016 – **Smart choices for cities. Alternative Fuel Buses.** In <http://www.clean-fleets.eu/> , Novembro 2016.
- COST TU0603, 2011 – **Buses with high level of service: Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research – Results from 35 European cities.** Final report.
- DIAZ, R.B., CHANG, M., DARIDO, G., KIM, E., SCHNEK, D., HAMILTON, B.A., HARDY, M., BUNCH, J., BALTES, M., HINEBAUGH, D., WNUK, L., SILVER, F., ZIMMERMAN, S., 2004 – **Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making.** Report No: FTA-VA-26-7222-2004.1, Federal Transit Administration, Washington, DC.
- DOMINGOS, P., 2016 – **Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis através de métodos incrementais.** Dissertação de doutoramento, LNEC, IST.

- ERNST, J., 2005 – **Initiating bus rapid transit in Jakarta**, Indonesia. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1903, 20–26.
- EUDY, L., POST, M., GIKAKIS, C., 2015 – **Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2015**. Technical Report NREL/TP-5400-64974, USA.
- EVANS, N., CLEMENT, S., WIMMER, F., CHESTERTON, V., 2014 – **Clean Buses – rolExperiences with Fuel and Technology Options. Clean fleets - purchasing clean public vehicles**. European Commission Intelligent Energy Europe Initiative project.
- FTA, 2001 – **Rouen’s Civis Revealed**. Urban Transport International, No. 33. TA BRT “Vehicle Scanning Tour”, November 9-17.
- FTA, 2009 – **Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making**. Project No. FTA-FL-26-7109.2009.1, Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation.
- GAO, 2001 – **Bus Rapid Transit Shows Promise** (PDF). GAO. Retrieved 16 March 2019.
- GHONIEM, A. F., 2011 – **Needs, resources and climate change: clean and efficient conversion technologies**. Progress in Energy and Combustion Science 37, pp 15-51.
- HENSHER, D. A., GOLOB, T. F., 2008 – **Bus rapid transit systems: a comparative assessment**. Transportation 35, 501–518.
- LAJUNEN, A., LIPMAN, T., 2016 – **Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses**. Energy 106, 329–342.
- MACEDO, A. L.; CARDOSO, J. L.; ROQUE, C. A, 2011 – **Apoio à revisão da norma de traçado - Elaboração de “documento base” para normas de projeto rodoviário**. LNEC - Proc. 0703/1/17572, Relatório 358/11, DT/NPTS.
- NAGAI, T., 2015 – Temporary restoration project of BRT instead of restoring railways on Tsunami-hit regions by the Great East Japan Earthquake. Comunicação pessoal.
- PHILLIPS, D., 2006 – **An Update on Curb Guided Bus Technology and Deployment Trends**. Journal of Public Transportation, 9 (3): 163-180. DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/2375-0901.9.3.9>.
- QIN, N., GUSRIALDI, A., BROOKER, P., T-RAISSI, A., 2016 – **Numerical analysis of electric bus fast charging strategies for demand charge reduction**. Transportation Research Part A Vol.94, pp 386–396.
- ROQUE, C. A.; CARDOSO, J. L., 2010 – **Sistemas de retenção rodoviários de veículos – Manual de aplicação. Disposições normativas**. InIR. Lisboa.
- ROQUE, C. A.; CARDOSO, J. L., 2011 – **Área adjacente à faixa de rodagem. Manual sobre aspetos de segurança**. InIR, Lisboa.
- SCHMIDT, B., WAMBOLD, J., KAWAMURA, A., DESCORNET, G. 2000 – **Piarc World Road Association. International Experiment to Harmonise Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedures**, Road Directorate, Danish Road Institute.
- SEABRA, I.; PINHEIRO, A.; MARCELINO, C.; SANTOS, D.; LEITÃO, J.; RODRIGUES, A., 2011 – **Tipologias de meios e modos de transporte**. Coleção Brochuras Técnicas/Temáticas.

- Gabinete de Planeamento, Inovação e Avaliação. Instituto da Mobilidade e Transportes Terrestres – IMTT. Lisboa.
- SYSTRA, 2015 – <https://www.systra.com/fr-projet/bhns-de-rouen-teor-lignes-1-2-3>, acedido em Novembro de 2016.
- TAN, H.-S., BU, F., JOHNSTON, S., BOUGLER, B., ZHANG, W.-B., SUN, S., 2009 – **Field Demonstration and Tests of Lane Assist/Guidance and Precision Docking Technology**. California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2009-12.
- TAN, H.-S., GULDNER, J., PATWARDHAN, S., CHEN, C., BOUGLER, B., 1999 – **Development of an Automated Steering Vehicle Based on Roadway Magnets. A Case Study of Mechatronic System**. Design IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, Vol. 4, No. 3, 1999, pp258-272.
- TfGM, 2015 – **Leigh to Ellenbrook Guided Busway**. Transport for Greater Manchester, Presentation to UITP Bus Committee, 20th November 2015.
- TOUSSAINT, L., 2010 – **Statistiques d'accélération des transports collectifs en cycle Urbain**. In Prévoir le bruit en milieu urbain, Nantes.
- TRB, 2003 – **Bus Rapid Transit – Volume 1 – Case studies in Bus Rapid Transit**. TCRP Report 90. Washington DC: Transportation Research Board.
- VAN DEN BOSSCHE, P., 2014 – **Battery Electric Vehicles – Now and in the Future. Clean Buses – Experiences with Fuel and Technology Options**. Clean fleets - purchasing clean public vehicles, European Commission Intelligent Energy Europe Initiative project.
- VUCHIC, V.R., 2007 – **Urban transit and technology**. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-75823-5.
- WIESINGER, P., 2014 – **Innovative Electric Buses in Vienna. Clean Fleets - purchasing clean public vehicles, Intelligent Energy Europe Initiative project. Case Studies**. [http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean Fleets case study Vienna - Final.pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean_Fleets_case_study_Vienna_-_Final.pdf)
- WIRASINGHE, S. C., KATTAN, L., RAHMAN, M. M., HUBBELL, J., THILAKARATNE, R., ANOWAR, S., 2013 – **Bus rapid transit – a review**. International Journal of Urban Sciences, 17:1, 1-31.
- WRIGHT, L., HOOK, W., 2007 – **Bus Rapid Transit Planning Guide**. Institute for Transportation and Development Policy, New York.
- ZAETTA R, MADDEN B., 2011 – **Hydrogen fuel cell bus e technology state of the art review**. NEXTHYLIGHTS Project Report, EC, Bruxelles.
- ZAVADA, J., ZAVADA, J.B., MILOS, K., 2010 – **Conditions for Implementing Trolleybuses in Public Urban Transport**. Traffic in the Cities.