

**Um novo modelo de simulação para testar
configurações de um corredor de transporte público**

Maria Teresa Pessoa Jorge Pessoa Vaz

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador

Professor Doutor Luis Miguel Garrido Martínez

Júri

Presidente: Professor Doutor João Torres de Quinhones Levy

Orientador: Professor Doutor Luis Miguel Garrido Martínez

Vogais: Professora Doutora Maria do Rosário Maurício Ribeiro Macário

Novembro de 2014

Agradecimentos

Ao Professor Luis Martínez, por me ter dado este desafio, pela ajuda e pelos conhecimentos que partilhou comigo, que me ajudaram a confirmar o meu interesse pela área dos Transportes e por me ter apoiado numa das melhores experiências da minha vida, ter feito parte desta investigação em Santiago do Chile.

À Professora Rosário Macário e ao Professor Luis Guerreiro, por me terem dado a oportunidade de estudar no Chile e à Ignacia Torres, por me ter recebido com tanta simpatia e disponibilidade.

Ao Professor Juan Carlos Muñoz por ter aceite o desafio de me receber na Pontifícia Universidade Católica do Chile, pela amizade, pelos conselhos para este trabalho e pelas suas aulas de Transporte Público durante este período.

Ao Maximiliano e ao Nikolas, os meus queridos amigos e companheiros de tese, e à Inês, por me terem ajudado a sentir em casa no Chile, pela companhia e boa disposição de todos os dias, que foram essenciais e nunca vou esquecer.

Ao Lucas, pela paciência e pela força que me deu e por me ter ajudado a rever este trabalho.

À Madalena Bártolo, pela sua disponibilidade e por me ter ajudado na formatação do documento.

Aos meus grandes amigos e à minha Avó Carlota, por toda a amizade e apoio, que me deram tanta força para fazer este trabalho.

Aos meus pais, Helena e António, que sempre puseram a família e a nossa educação em primeiro lugar, por todas as oportunidades que me deram, pelos valores que me transmitiram e pelo exemplo de vida que são. Agradeço-lhes muito também a disponibilidade para ler e reler este trabalho.

Resumo

O transporte público é um dos elementos básicos de uma cidade e tem influência na forma urbana e na sua habitabilidade, tanto do ponto de vista social, económico como ambiental. Uma das questões fundamentais no planeamento e na política de transportes públicos é a escolha modal e trata-se de um processo complexo, que deve ter em conta os interesses dos passageiros, dos operadores e da sociedade.

O objetivo principal desta dissertação foi desenvolver um modelo baseado em simulação que avaliasse o desempenho de diferentes modos de transporte num corredor de transporte público, sujeito a diferentes tipologias de procura.

Os resultados do modelo de simulação serviram de base a uma análise multi-critério que comparou o desempenho dos diferentes modos de transporte, sujeitos às mesmas condições e padrões de procura.

Este trabalho incluiu o estudo de indicadores de desempenho de transportes públicos, baseados na perspectiva da sustentabilidade, e das características de diferentes tipos de exploração: Bus Rapid Transit, Autocarro regular, Light Rail Transit e Metro.

Palavras chave: transporte público, avaliação de desempenho, indicadores, modelo de simulação

Abstract

Public transportation is one of the basic functions in urbanized areas that influences the form of cities and their livability, based on their social, economic and environmental pillars. Modal choice is considered one of the fundamental issues in the planning and policy and it is a complex process that should take into account the interests of the passengers, operators and society.

The main purpose of this dissertation was to develop a simulation based method for a corridor of public transportation, to assess the performance of different transport modes in presence of different types of demand.

The results provided by the simulation model served as base of a multi-criteria analysis that compared the performances of the different transportation modes, subject to the same environment and demand patterns.

This work included a study of a set of sustainable indicators and the main characteristics of different types of exploitation as the Bus Rapid Transit, the conventional bus, the Light Rail Transit and the underground.

Key words: public transportation, performance analysis, indicators, simulation method

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Índice de Quadros.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
Lista de Siglas.....	viii
I. Introdução.....	1
I.1 Motivação.....	1
I.2 Objetivos.....	3
I.3 Estrutura da dissertação.....	4
II Estado de Arte.....	5
II.1 Introdução.....	5
II.2 Indicadores de sustentabilidade para a avaliação do desempenho de um corredor de transportes públicos.....	6
II.2.1 Medidas de desempenho na perspetiva da sustentabilidade.....	6
II.2.2 Critérios de seleção.....	7
II.2.3 Indicadores de desempenho.....	11
II.3 BRT, LRT, Autocarro e Metro.....	23
II.3.1 Caracterização dos modos de transporte.....	23
II.3.2 BRT e BHLS.....	25
II.3.2 LRT.....	28
II.3.3 Autocarro convencional.....	29
II.3.4 Metro.....	30
II.4 Avaliação de desempenho: análise multi-critério.....	31
II.5 Conclusões.....	34
III. Modelo de Simulação.....	39
III.1 Apresentação dos conceitos principais utilizados na Simulação.....	40
III.1.1 Modelação Matemática e Simulação.....	40
III.1.2 Teoria de Filas de Espera.....	41
III.2 Estrutura do modelo.....	44
III.3 Descrição da construção do modelo.....	45
III.3.1 Construção do ambiente de simulação.....	45
III.3.2 Construção dos eventos e funções do modelo.....	51

III.3.3 Parametrização do modelo	52
III.3.4 Configuração do modelo	53
III.4 Apresentação de resultados	55
III.5 Avaliação de desempenho. Análise multi-critério.....	61
III.6 Conclusões	70
IV Conclusão e desenvolvimentos futuros	73
Bibliografia.....	77
Anexos	II
Anexo I – Esquema ilustrativo do Ambiente de Simulação	III
Anexo II – Matriz Pares Origem Destino utilizada no modelo de simulação	IV
Anexo III – Indicadores de desempenho para os diferentes níveis de procura estudados	V

Índice de Quadros

Quadro 1 - Exemplos de medidas de desempenho segundo o ponto de vista económico, social e ambiental	8
Quadro 2 - Exemplos de medidas de desempenho de eficiência e eficácia	9
Quadro 3 - Exemplos de medidas de desempenho segundo os passageiros, o operador e a comunidade	10
Quadro 4 - Headways e LOS	13
Quadro 5 - Duração do serviço e LOS.....	14
Quadro 6 - Níveis de conforto num transporte público.....	19
Quadro 7 - Custos de diferentes modos de transporte	21
Quadro 8 - Indicadores de desempenho: impactos ambientais de um sistema de PT.	22
Quadro 9 - Medidas de desempenho segundo os pontos de vista do passageiro, do operador e da comunidade	22
Quadro 10 - Características dos modos de transporte de acordo com as diferentes categorias	23
Quadro 11 - Medidas e Indicadores de desempenho de um sistema de transporte público.....	36
Quadro 12 - Indicadores de desempenho a serem analisados no modelo de estudo .	36
Quadro 13 - Principais características dos modos de transporte	37
Quadro 14 - Indicadores de modelos de filas de espera.....	43
Quadro 15 - Dados para o modelo: características dos modos de transporte	52
Quadro 16 - Configurações dos <i>inputs</i> do modelo	54
Quadro 17 - Indicadores de avaliação de desempenho de sistemas de PT	55
Quadro 18 – Fator emissão e custos dos diferentes modos de transporte	55
Quadro 19 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, BRT	56
Quadro 20 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, LRT.....	56
Quadro 21 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, BUS	57
Quadro 22 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, METRO	57
Quadro 23 - Desempenho médio dos diferentes modos de transporte, com a padronização hipergeométrica.....	61
Quadro 24 - Limites pré-definidos para a segunda padronização	62
Quadro 25 - Desempenho médio dos diferentes modos de transporte, com a padronização por intervalos pré-definidos.....	63
Quadro 26 - Configurações de frequência, capacidade e velocidade operacional do veículo experimentadas no modelo para cada nível de procura.....	74
Quadro 27 - Indicadores de desempenho	74

Índice de Figuras

Figura 1 - Objetivos de um sistema de transporte sustentável	8
Figura 2 - Esquema ilustrativo do corredor de transportes públicos	44
Figura 3 - Objetos da Simulação.....	48
Figura 4 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 3).....	48
Figura 5 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 5).....	49
Figura 6 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 1).....	50
Figura 7 - Parameter Variation Experiment	53
Figura 8- Desempenho dos modos de transporte para a procura de 1000 pass/h	64
Figura 9 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 5000 pass/h	65
Figura 10 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 15000 pass/h .	66
Figura 11 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 30000 pass/h .	67
Figura 12 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 45000 pass/h .	68
Figura 13 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 60000 pass/h .	69

Lista de Siglas

BHLS - Bus with High Level of Service - Autocarro com alto nível de serviço

BRT - Bus Rapid Transit

BUS - Autocarro regular

LRT - Light Rail Transit

CBA - Análise custo benefício

MCA - Análise multi-critério

PT - Transportes públicos

LOS – Nível de serviço

I. Introdução

I.1 Motivação

Durante a segunda metade do século XX, as cidades aumentaram significativamente, tanto em número como em dimensão. Segundo dados recolhidos do World Bank, em 2012, 53% da população mundial vive em áreas urbanas.

A procura por mobilidade em áreas urbanas tem aumentado com a crescente necessidade da população em participar nas diversas atividades que uma cidade oferece, de carácter profissional, pessoal ou social (Eboli & Mazzulla, 2010). A mobilidade é vital para o mercado interno e para a qualidade de vida dos cidadãos, na medida em que assegura a capacidade de pessoas e bens se moverem livremente (Livro Branco Transportes, 2011).

Desta forma, a atividade dos transportes é essencial para a economia, o ambiente e para a sociedade e é um dos principais elementos que definem a forma das cidades. (Vuchic, 2005)

O transporte público é considerado uma infraestrutura fundamental no planeamento e desenvolvimento da cidade, sendo a resposta às necessidades de mobilidade da população que visa a sustentabilidade. Desta forma, é importante planear um adequado sistema de transportes públicos, que incentive os passageiros que utilizam os seus automóveis a mudarem de hábitos e a procurarem o transporte público como alternativa, aumentando a mobilidade, intensificando as atividades económicas da região e melhorando a qualidade de vida nas cidades (Vuchic, 2005).

Num estudo de sistemas de transportes é importante perceber, em primeiro lugar, os requisitos dos vários intervenientes: passageiros, os operadores e a comunidade. Um bom planeamento de transportes deve ter em em conta, em simultâneo, os interesses dos grupos referidos, procurando adequar as características do serviço da melhor forma possível.

Nas sociedades modernas, os usuários esperam serviços em tempo hábil, conexões confiáveis, viagens confortáveis, diversidade na escolha de opções de viagens e serviços que respondem às suas necessidades. As pessoas que optam pelo uso do carro privado dão valor à autonomia que este permite, ao conforto e à conveniência dos serviços porta a porta, à rapidez e à flexibilidade. O uso excessivo do carro privado leva a problemas causados pela congestionamento, como as questões ambientais relacionadas com as excessivas emissões de CO₂, que aceleram as alterações climáticas, os problemas sociais, relacionados com acidentes de viação e a forte dependência de combustíveis fósseis, e as limitações e assimetrias no que diz respeito à acessibilidade, que prejudicam a qualidade de vida dos cidadãos, podendo conduzir à exclusão social (Eboli & Mazzulla, 2010).

Por outro lado, na maior parte das vezes, o custo de utilização dos transportes públicos é menor do que o do automóvel e o facto do passageiro não ter de conduzir provoca menos

stress e traz a possibilidade de descansar e realizar outras atividades em simultâneo como ler ou escrever (Beirão & Cabral, 2007). Além de ser a opção de transporte para aqueles que não têm acesso a veículo privado, deve também constituir uma alternativa atrativa para os que o possuem, de modo a mitigar os efeitos referidos anteriormente (Murray et al, 1998).

Atualmente os governos procuram um planeamento de transportes sustentável que garanta que são tidos em conta os objetivos sociais, ambientais e económicos da região (T. Litman, 2011). O crescente interesse pela sustentabilidade reflete o desejo humano pelo desenvolvimento de um mundo melhor, através de soluções que integrem a natureza das atividades humanas de diferentes grupos e sectores que deixem uma marca positiva e duradoura na sociedade (T. Litman, 2008).

A nível mundial o sector de transportes consome mais de 60% dos produtos petrolíferos, que constituem cerca de 98% do consumo de energia de transporte. O consumo de produtos petrolíferos pelos transportes está diretamente relacionado com a composição da emissão de poluentes (OECD, 1999) .

Um sistema de transportes públicos sustentável deve operar de forma eficiente, oferecendo escolhas de modo de transporte que correspondam aos requisitos dos passageiros, deve ser economicamente viável, deve restringir o limite de emissões, poluição e ruído e minimizar o consumo de recursos não renováveis (T. Litman, 2008).

Ortúzar e Willumsen (2001) defendem que a questão mais importante no planeamento e na política de transportes públicos é a escolha do modo de transporte, pois esta afeta a eficiência geral com a qual podemos viajar em áreas urbanas, a quantidade de espaço urbano dedicado a funções de transporte e as opções que estão disponíveis para os cidadãos.

Para um bom planeamento é essencial definir com precisão cada modo, as suas componentes e características e entender as relações entre os diferentes modos, procurando uma correta integração entre estes e evitando avaliações simplificadas baseadas apenas num só critério, como o de menor custo (Vuchic, 2002).

Para ajudar as agências de transportes e os governos a determinar o desempenho dos sistemas de transportes públicos, são utilizadas medidas de desempenho de forma a entender, através de uma correta avaliação, como o sistema está e determinar para onde quer evoluir.

As medidas de desempenho ajudam a identificar potenciais problemas e a construir novas soluções (Dhingra, 2011). Cada medida pode ser mensurada através de vários indicadores, que avaliam a execução dos projetos em relação aos seus objetivos estabelecidos (Eboli & Mazzulla, 2012). A escolha dos indicadores é determinante na avaliação do desempenho do sistema e estes devem ser simples, compreensíveis, lógicos e acessíveis (T. Litman, 2009).

No planeamento de transportes, utilizam-se métodos de avaliação que quantificam e relacionam os indicadores escolhidos. É importante conhecer quais os métodos desenvolvidos nesta área, quais os mais utilizados e entender as suas vantagens e limitações.

O estudo dos indicadores e das metodologias de desempenho prende-se com a necessidade de adequar melhor os temas de transportes coletivos às necessidades das pessoas, permitindo mais escolhas de transporte, melhorando a acessibilidade e contribuindo para que os investimentos públicos e privados neste sector sejam feitos de forma mais eficaz.

Por estas razões é importante encontrar um mecanismo que optimize a oferta que é prestada aos utilizadores, medindo o desempenho de sistemas de transportes públicos, perante o paradigma da sustentabilidade social, económica e ambiental.

I.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um modelo baseado em simulação que pretende avaliar o desempenho de diferentes modos de transporte de um corredor de transporte público sujeitos a diferentes tipologias de procura.

A primeira parte deste projeto pretende estudar um conjunto de indicadores baseados em pilares de sustentabilidade social, económica e ambiental que avaliem o desempenho de um corredor de transporte público sujeito a diferentes tipos de exploração como BRT, autocarro convencional, LRT e metro. A especificação dos indicadores e destes modos é suportada por literatura que caracteriza cada um destes modos e que descreve os indicadores.

A segunda parte da dissertação tem como objetivo desenvolver um procedimento baseado em simulação por filas de espera que reproduza as operações de transporte público num corredor. Esta simulação integrará o comportamento estocástico da procura (chegadas a paragens e pares OD), as características de operação de cada modo de transporte (tempo de viagem, capacidade, frequência, velocidade comercial) e as condições de tráfego.

Finalmente, apresenta-se uma análise multi-critério que compara o desempenho dos diferentes modos de transporte sujeitos às mesmas condições e padrões de procura.

I.3 Estrutura da dissertação

Este documento está dividido em quatro capítulos distintos:

Introdução – Neste capítulo apresenta-se a contextualização do problema, os objetivos a cumprir e quais os métodos usados para alcançá-los.

Revisão da literatura – O segundo capítulo consiste numa revisão da literatura relevante para este estudo. Em primeiro lugar, são introduzidas as principais características dos modos de transporte escolhidos assim como os seus padrões de procura (Bus Rapid Transit, Light Rail Transit, Autocarro Convencional e Metro). Em seguida, é apresentado um estudo de indicadores de sustentabilidade que avaliam o desempenho do corredor sujeito aos tipos de exploração referidos. Por fim, introduzem-se as principais características da análise multi-critério, recolhidas na literatura.

Desenvolvimento do modelo de simulação - Começa-se por introduzir os conceitos utilizados no modelo de simulação. Em seguida, é feita a descrição da construção do modelo, os seus parâmetros e os diferentes componentes, assim como a relação entre estes e os testes realizados para compreender o desempenho do sistema. No sub-capítulo seguinte são apresentados os resultados e é realizada uma análise de desempenho e por fim retiram-se as principais conclusões.

Conclusão – No quarto capítulo, são explicadas as principais conclusões deste trabalho e são sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

II Estado de Arte

II.1 Introdução

Entender o comportamento dos transportes e as razões para a escolha de um modo de transporte em detrimento de outro é uma questão essencial e complexa. Cada modo de transporte tem características específicas, vantagens e desvantagens, diferentes custos e a sua escolha pode variar ao longo do tempo e com o tipo de viagem (Beirão & Sarsfield Cabral, 2007).

Os transportes públicos têm um papel fundamental no desenvolvimento sustentável de uma região e influenciam o ambiente e a saúde dos habitantes. Os efeitos de um sistema de transporte no ambiente em que se insere variam com o modo de transporte, a sua eficiência do ponto de vista energético, o tipo de combustível utilizado, o volume de tráfego, entre muitos outros fatores (OECD, 1999).

No âmbito de melhorar a qualidade dos sistemas de transporte, as medidas de desempenho são uma ferramenta fundamental no planeamento de transporte. Medir a eficácia do desempenho dos transportes é essencial para alcançar os objetivos previstos assim como para planear futuras melhorias. As agências devem por isso procurar métodos adequados para avaliar e monitorizar o desempenho do sistema de transporte público (Transportation Research Board, 2003a).

Neste capítulo pretende-se fazer uma revisão dos diferentes indicadores de desempenho de um corredor de transporte público, das características principais de diferentes modos de transporte e dos diferentes métodos adotados na literatura para avaliar o seu nível de serviço de uma forma objetiva.

O estudo será feito com principal enfoque nos seguintes modos de transporte: Bus Rapid Transit (BRT), , Light Rail Transit (LRT), Autocarro convencional(BUS) e Metro (METRO).

Em seguida apresenta-se a estrutura deste capítulo:

II.2. Estudo dos indicadores que avaliam o desempenho de um sistema de transporte público, representado por um corredor;

II.3. Revisão dos processos de identificação dos diferentes tipos de exploração: BRT, LRT, BUS e METRO;

II.4. Descrição do método de análise multi-critério

II.5. Apresentação das principais conclusões do capítulo e das considerações relevantes para o desenvolvimento do modelo de simulação;

II.2 Indicadores de sustentabilidade para a avaliação do desempenho de um corredor de transportes públicos

II.2.1 Medidas de desempenho na perspetiva da sustentabilidade

Definição

Medir o desempenho de um serviço ou de uma atividade consiste em avaliar os resultados do mesmo em função dos recursos despendidos (dinheiro, pessoas, veículos) e do ambiente onde é realizado.

Uma medida de desempenho é uma medida de avaliação de um aspeto específico do serviço de transporte (Transportation Research Board, 2003c). Cada medida pode ser mensurada através de vários indicadores, que mostram o progresso até um determinado objetivo de desempenho (Eboli & Mazzulla, 2012). Isto é, os indicadores de desempenho são resultados mensuráveis específicos utilizados para avaliar a execução de programas ou projectos em relação aos objetivos estabelecidos (T. Litman, 2009). Estes podem descrever características quantitativas ou qualitativas, como a frequência do serviço ou o conforto, respetivamente (Eboli & Mazzulla, 2010).

Utilidade

As medidas de desempenho são uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho do sistema de transportes e podem ter diferentes finalidades, desde a avaliação do desempenho global do sistema de tráfego, ao ajustamento dos objetivos das agências de planeamento de sistemas de trânsito às expectativas comunitárias, ao controlo de gestão e diagnóstico de problemas, entre outros (Eboli & Mazzulla, 2012). Podem ser aplicadas em diferentes estudos: planeamento do uso do solo, planos de transporte a longo prazo, estudo de corredores, programação, análise ambiental, avaliação de desempenho (EPA, 2011).

Uma avaliação de desempenho baseada em indicadores de desempenho pode ser aplicável tanto em comparações inter-modais como em comparações multi-modais. A utilização de parâmetros aplicáveis a todos os tipos de transporte deverá resultar em melhores escolhas feitas pelas agências de transportes ou por outras entidades de planeamento de transportes, quando é necessário melhorar um sistema de transporte existente, especialmente quando a falta de recursos pode exigir a diminuição da utilização de um modo de transporte e a expansão de outro (Lem, Li, & Wachs, 1994).

II.2.2 Critérios de seleção

Os indicadores de desempenho oferecem às agências um sistema de orientação que indica onde a organização está, onde quer ir, e como chegar lá, pois ajudam a identificar os problemas desenvolvidos e a eficácia das soluções. Devem, por isso, ser escolhidos cuidadosamente de forma a refletir com precisão os objetivos pretendidos ou os problemas indicados (T. Litman, 2009).

Um bom indicador utilizado como medida de desempenho deve ser simples, compreensível, acessível, lógico e repetível. Deve também ser corretamente definido, ter em conta diferentes perspectivas e indicar efetivamente a que nível as metas e os objetivos estão a ser cumpridos (T. Litman, 2009). A recolha de dados deve refletir padrões elevados para assegurar que as informações sejam precisas e consistentes. Por vezes, um conjunto mais pequeno de indicadores com dados facilmente disponíveis é mais conveniente para recolher e analisar, mas pode ignorar importantes impactos. Por outro lado, um conjunto demasiado elevado de indicadores pode permitir um estudo mais completo, mas por vezes com custos excessivos e com elevado conjunto de dados (B. T. Litman, 2011).

Desta forma a seleção dos indicadores de desempenho é largamente afetada pelas condições e contexto local e a disponibilidade de informação, apresentando grande parte deste indicadores várias especificações matemáticas alternativas (OECD, 1999) (Eboli & Mazzulla, 2012)

Na literatura existem diferentes classificações de medidas de desempenho de transportes. Em seguida, destacam-se três critérios utilizados na literatura para classificar os indicadores de desempenho de um sistema de transporte público.

Sustentabilidade Económica, Social e Ambiental

O planeamento sustentável reconhece que as decisões no sector dos transportes afetam pessoas de diversas formas e por isso devem ser considerados vários objetivos e impactos, que procurem o desenvolvimento económico e a igualdade social e que melhor preservem a qualidade ambiental (EPA, 2011). Isto é, autores como Litman, consideram que os objetivos do planeamento de transportes se dividem nestas três áreas: económica, social e ambiental. A integração destas três áreas permite que as decisões a curto prazo sejam consistentes com os objetivos estratégicos a longo prazo (T. Litman, 2013).



Figura 1 - Objetivos de um sistema de transporte sustentável (T. Litman, 2013)

Um adequado e eficiente movimento de pessoas e bens melhora a produtividade e estimula o crescimento económico.

A equidade social depende em grande medida do sistema de transportes, pois a existência de opções de transporte é fundamental para que pessoas com baixos rendimentos e sem acesso a carro privado se possam deslocar e ir trabalhar .

Apesar de nas últimas três décadas terem sido melhoradas as características dos motores dos veículos, reduzindo as suas emissões, a qualidade atmosférica nas áreas metropolitanas continua a ser um dos principais problemas ambientais, sobretudo devido ao crescimento do uso dos transportes e ao congestionamento do tráfego (EPA, 2011). No Quadro 1 são apresentados alguns exemplos de medidas de desempenho agrupadas segundo a classificação descrita:

Ponto de vista económico	Ponto de vista social	Ponto de vista ambiental
> Congestionamento	> Equidade social	> Poluição aérea
> Custos de infraestrutura	> Impactos na mobilidade	> Alterações climáticas
> Preço	> Coesão da sociedade	> Impactos nos habitats
> Barreiras à mobilidade	> Habitabilidade da comunidade	> Uso de recursos não renováveis
> Acidentes	> Estética	
> Uso de recursos não renováveis		

Quadro 1 - Exemplos de medidas de desempenho segundo o ponto de vista económico, social e ambiental (T. Litman, 2013)

Medidas de eficiência e eficácia:

É importante fazer a distinção entre medidas de desempenho que avaliam a eficiência e as que medem a eficácia de um sistema de transporte público. As medidas de eficiência avaliam os recursos necessários, dinheiro, energia, etc., para atingir determinados resultados. As medidas de eficácia indicam o nível do serviço, ou seja, de que forma a agência cumpre os objetivos a que se propõe e de que maneira a agência satisfaz as necessidades dos clientes e da comunidade (Talley, 1986).

Desta forma, é possível existir um sistema com um serviço eficiente mas que não é eficaz ou, por outro lado, pode haver um serviço com um alto nível de eficácia mas pouco eficiente (Dalton, D. et al, 2000). Melhorar o desempenho de uma organização deve ter em conta tanto o que diz respeito à eficiência como à eficácia do mesmo. Por exemplo, um operador de transportes pode reduzir os *inputs* utilizados, como o tamanho da frota, o que levará a um aumento aparente da eficiência do sistema. Porém, o facto de utilizar menos veículos para servir o mesmo número de passageiros pode reduzir a eficácia no que diz respeito à satisfação dos passageiros (Bhagavath, 2006).

No quadro seguinte apresentam-se algumas medidas de eficiência e de eficácia de um sistema de transporte público.

Eficiência	Eficácia
> Custo-eficiência (custo de operação per capita)	> Oferta (passageiro per capita; passageiro-viagem por hora)
> Taxa de utilização do veículo (veículo km por veículo)	> Qualidade do serviço (velocidade média, <i>headway</i> médio, número de acidentes)
> Produtividade (passageiros-viagens por trabalhador)	> Disponibilidade (número de dias de serviço por semana)
> Uso de energia (veículo-km por kW-h)	

Quadro 2 - Exemplos de medidas de desempenho de eficiência e eficácia (Dalton, D. et al, 2000)

Passageiros, Operador, Comunidade

As medidas de desempenho podem também ser classificadas em três categorias segundo os grupos afetados pelo sistema de transporte, sendo o ponto de vista do utilizador, que reflete a perceção do serviço por parte do passageiro, o ponto de vista do operador, ou seja do negócio da agência de transportes e da comunidade, que tem em conta os impactos que o sistema provoca na sociedade, desde a empregabilidade, crescimento económico ou impactos ambientais. Algumas das medidas são comuns a dois dos grupos ou mesmo aos três. Os requisitos destes grupos devem ser considerados em conjunto, procurando-se um sistema de transportes público com um serviço adequado (Lee, 2008).

Os atributos mais importantes para os passageiros podem ser definidos como parâmetros de qualidade do serviço e estão relacionados com a segurança pessoal, segurança a bordo e com a confiança no serviço (Eboli & Mazzulla, 2010).

Vuchic (2005) afirma que os critérios mais importantes do ponto de vista do passageiro são o menor tempo possível de viagem, menor distância e menor custo. Se os requisitos dos passageiros não são cumpridos, a procura é menor e isso afeta o lado do operador e da comunidade.

O operador do sistema de transporte público deve procurar um determinado nível de qualidade de serviço que atraia passageiros e ao mesmo tempo maximize a eficiência das operações (Vuchic, 2005).

Os requisitos de desempenho da comunidade são normalmente mais rigorosos do que os do operador e, ao contrário destes últimos, têm em conta objetivos diversificados tanto a curto como a longo prazo (Vuchic, 2005).

No Quadro 3 encontram-se algumas medidas de desempenho de cada um destes três grupos.

Passageiro	Operador	Comunidade
> Acessibilidade	> Área de cobertura	> Confiança
> Confiança	> Confiança	> Impactos Sociais
> Conforto	> Flexibilidade	> Impactos Ambientais
> Segurança	> Segurança	> Segurança
> Preço	> Custos	> Custos

Quadro 3 - Exemplos de medidas de desempenho segundo os passageiros, o operador e a comunidade (Vuchic, 2005)

II.2.3 Indicadores de desempenho

1. **ACESSIBILIDADE:**

Quantificar o nível de serviço de uma rede de transportes públicos é uma tarefa complexa. A acessibilidade dos transportes públicos é uma questão multidimensional, isto é, depende de um elevado número de fatores, como a distância às paragens, o tempo de viagem a bordo, tempos de espera, número de destinos possíveis, número de transbordos necessários, entre outros. Além disso, um sistema de transporte pode apresentar diferentes rotas coordenadas de várias formas e determinar a extensão destas rotas pode constituir um desafio (Mishra, Welch, & Jha, 2012).

Geurs & Wee (2004) apresentam o conceito de acessibilidade relativa, definindo-a como o nível como dois lugares ou pontos dentro de uma área estão conectados.

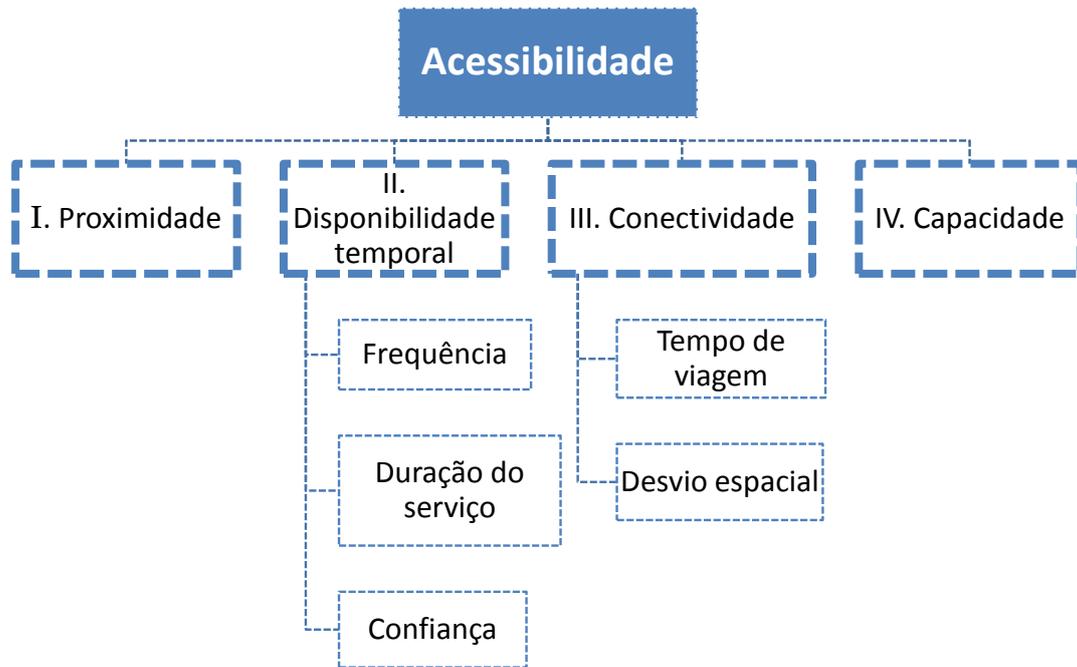
Os estudos de acessibilidade podem ter diferentes direções, consoante os objetivos de cada situação, mas todos eles pretendem quantificar ou medir as facilidades e dificuldades de acesso. O tempo gasto pelo passageiro, desde uma dada origem até ao ponto de embarque e do ponto de desembarque até o destino final, influencia o nível de satisfação do sistema de transporte público (Cardoso, 2006).

Muitas vezes, os conceitos de acessibilidade e de disponibilidade de um sistema de transportes não estão bem clarificados na literatura (Diana & Idraulica, 2010).

De acordo com o Transportation Research Board (2003), um serviço de transporte deve cumprir distintos requisitos de disponibilidade, que podem ser divididos em quatro tipos: A **disponibilidade espacial** indica onde é prestado o serviço, até onde o passageiro pode chegar, se o serviço está disponível perto da sua origem, etc., ou seja, inclui a proximidade a estações e a conectividade da rede. A **disponibilidade temporal** indica quando é que o serviço pode ser prestado. A **disponibilidade de informação** avalia se o cliente tem informação clara e suficiente para saber como usar o serviço e, por fim, a **disponibilidade de capacidade** refere-se à existência de espaço para o passageiro no veículo, na viagem pretendida.

A acessibilidade, neste contexto, avalia a capacidade dos passageiros chegarem aos seus destinos utilizando transportes públicos (EPA, 2011) e abrange diferentes medidas de desempenho.

Para melhor compreensão, neste capítulo estudam-se os principais indicadores relacionados com a acessibilidade de um sistema de transportes públicos dividindo-os em Proximidade, Disponibilidade temporal, Conectividade e Capacidade do serviço.



I. Proximidade e Cobertura

Os passageiros podem estar dispostos a andar até uma determinada distância desde a sua origem até à paragem ou de uma paragem até ao seu destino (EPA, 2011).

Vuchic (2005) refere-se a esta medida como “disponibilidade espacial”, considera-a um requisito do ponto de vista do passageiro e defende que as estações ou as paragens do sistema de transporte devem estar razoavelmente perto tanto da origem do passageiro como do seu destino.

Se existirem mais paragens, os passageiros podem usufruir de uma melhor proximidade ao sistema, no entanto, mais paragens implicam maior tempo de viagem (Murray & Wu, 2003).

Os indicadores de proximidade podem ser estimados pelo tempo ou pela distância de caminhada desde a origem até à estação mais próxima (Rodriguez & Targa, 2003). Segundo Murray e Wu (2003), um tempo de caminhada até 5 minutos é considerado razoável ou, em termos de distância, 400 metros.

A acessibilidade às estações, que se traduz pela proximidade à mesma do ponto de vista dos passageiros, pode ser analisada através do conceito de cobertura de rede, do lado do operador. Segundo Vuchic (2005), para redes regulares, o primeiro nível de cobertura de rede é definido pela área cujo tempo de acesso a pé até à estação é no máximo 5min. O segundo nível de cobertura compreende áreas com tempos de acesso, a pé, entre 5 e 10min. Além disso, este autor apresenta uma medida mais precisa para este parâmetro que consiste na percentagem de população servida entre a população total da zona.

II. Disponibilidade temporal

Nesta secção estudam-se os três parâmetros que influenciam a disponibilidade do serviço: frequência, horas de serviço e confiança no serviço.

II.1 Frequência

A frequência do serviço é dada pelo número de unidades de trânsito, que se movem no mesmo sentido e numa dada via ou linha, que passam num determinado ponto com um intervalo de tempo específico. Por outras palavras, a frequência do serviço determina quantas vezes numa hora, por exemplo, o passageiro tem acesso a um modo de transporte (Transportation Research Board, 2003c).

O conceito de *headway* consiste no intervalo de tempo entre a passagem de duas unidades de trânsito sucessivas no mesmo local, que realizam o mesmo percurso (HCM, 2000b). Usualmente este indicador é medido em segundos ou minutos e o tempo mínimo para um *headway* é determinado tendo como base as características físicas do sistema e as operações da paragem (Vuchic, 2005). Pode ser de dois minutos, de forma a evitar o efeito de *bunching* em autocarros ou constrangimentos de sinais na linha férrea. O tempo de *headway* máximo pode variar entre 30 minutos a 2 horas (Transportation Research Board, 2003a).

O manual do Transportation Research Board (2003b) identifica diferentes níveis de serviço (Level of Service, LOS) para valores de frequências e de *headways* para uma viagem urbana, representados no quadro seguinte:

LOS	Frequência (veh/h)	Headway (minutos)
A	>6	<10
B	5-6	10-14
C	3-4	15-20
D	2	21-30
E	1	31-60
F	<1	>60

Quadro 4 - Headways e LOS (Transportation Research Board, 2003c)

Os passageiros estão interessados em pequenos *headways* para minimizar o tempo de espera. Contudo, do ponto de vista do operador, *headways* menores exigem mais unidades de transporte. Desta forma, um *headway* adequado deve ter em conta o tempo de viagem dos passageiros e os custos de operação (Vuchic, 2005).

II.2 Duração do serviço

A disponibilidade temporal do serviço de transportes depende do número de horas que é prestado o serviço num dia. A duração do serviço pode variar de acordo com os dias da

semana, com a viagem escolhida e até mesmo com a paragem (Transportation Research Board, 2003a).

A acessibilidade temporal, ou disponibilidade de um serviço, pode ser nula em determinados períodos do dia, como por exemplo, nos corredores de autocarros que não funcionam em certas horas do dia (Cardoso, 2006).

Em seguida apresentam-se os valores propostos pelo Transportation Research Board (2003b) para este parâmetro, assim como a respetiva classificação de nível de serviço (LOS).

LOS	Horas de Serviço
A	19-24
B	17-18
C	14-16
D	12-13
E	4-11
F	0-3

Quadro 5 - Duração do serviço e LOS (Transportation Research Board, 2003c)

Vuchic (1981) distingue três tipos de serviço, consoante o tipo de operação. O primeiro consiste nos serviços regulares, em que o sistema de transporte está disponível durante a maior parte do dia, o segundo, chamado serviço de hora de ponta, refere-se aos serviços que operam apenas durante as horas com maior congestionamento e, por fim, os serviços irregulares ou especiais, que existem em eventos especiais ou em condições de emergência.

II.3 Confiança

A confiança num sistema de transporte público pode ser definida como a probabilidade de um serviço de transporte desempenhar a função para a qual está destinado, quando sujeito a um determinado ambiente e condições operacionais e para um período específico (Tahmasseby, 2009). Esta medida de desempenho baseia-se na regularidade do tempo entre a chegada de sucessivas unidades de transporte e no desempenho do sistema em termos do tempo de viagem dos passageiros, tanto de espera na paragem, como a consistência do tempo de chegada ao destino, ou seja, está relacionada com a pontualidade (HCM, 2000b).

A confiança, associada ao conceito estatístico de variabilidade de tempo de viagem, é geralmente dada pelo desvio padrão ou pela variância da distribuição dos tempos de viagem

ou por uma variável *dummy* que indica se a unidade de transporte está atrasada ou a horas (Bates, Polak, Jones, & Cook, 2001).

Vuchic propõe como medida da confiança no sistema de transporte a percentagem da chegadas de veículos com menos de um tempo fixo de atraso ou adiantamento em relação ao horário. A taxa de pontualidade do metro encontra-se entre 97 e 99%, para o modo semi-rápido este valor pode variar entre 90 a 96%, caso seja hora de ponta, ou não, e por fim para autocarros pode variar entre 75 a 80%, apresentando uma variação muito maior entre a hora de ponta e o período de tráfego normal (Vuchic, 2005).

A confiança no sistema de transportes é um dos aspetos mais estudados na literatura (Eboli & Mazzulla, 2012). Hadas e Ceder afirmam que o parâmetro que mais influencia a escolha de um determinado serviço é a confiança no mesmo, ou seja, a maior causa de desistência de um serviço por parte dos atuais ou potenciais passageiros é o facto de não confiarem nesse serviço (Hadas & Ceder, 2010). A pontualidade de um sistema afeta a percepção da qualidade do serviço por parte do passageiro e a respetiva escolha do modo. Por vezes, os passageiros valorizam mais uma redução da variabilidade dos tempos de chegada de uma unidade de trânsito do que uma redução do tempo de viagem (Bates et al., 2001).

Do ponto de vista da oferta, do operador, a definição mais correta de confiança é 1 menos a probabilidade do sistema de transporte falhar. Estas falhas devem-se a vários motivos, como falhas tecnológicas, operacionais, interferência de outros sistemas, entre outros. A confiança de um sistema de transportes deve ser medida através das consequências dessa falha no sistema, ou seja, através do tempo perdido ou tempo necessário para resolver o problema, da perda de combustível ou perda de clientes, entre outros. A confiança do sistema, do lado do operador, pode também ser medida pelo tempo médio, ou pela distância média entre falhas no sistema. Uma confiança no sistema insatisfatória pode implicar custos de operação maiores (Vuchic, 2005).

Além do passageiro e do operador, a comunidade também pretende um serviço de confiança que seja capaz de proporcionar serviços básicos em caso de emergência (Vuchic, 2005).

III. Conectividade

Um sistema de transporte público que apresente uma boa conectividade atrai novos passageiros e mantém os atuais, que pretendem tempos de viagem reduzidos, conexões de confiança, com transbordos fáceis e seguros (Metropolitan Transportation Commission, 2005).

A conectividade de um sistema de transportes públicos pode ser definida pela probabilidade dos nós de uma rede estarem conectados e acessíveis (Tahmasseby, 2009).

A conectividade influencia a imagem de uma rede de transporte e depende de muitos fatores, como da coordenação das diferentes rotas, dos transbordos, da cobertura da rede de

transportes, do horário, da velocidade e da capacidade do veículo. Por esta razão existem muitos fatores que interagem entre si, tornando a análise de desempenho com base na conectividade do sistema um problema complexo (Mishra et al., 2012).

III.1 Tempo de viagem e velocidade

O tempo de viagem de um ponto de origem ao seu destino afeta a qualidade e a eficiência do sistema de transporte público (Sampaio et al., 2005) e engloba o tempo de acesso até à paragem, o tempo de espera, o tempo a bordo do veículo, o tempo de transbordo e o tempo de saída (Tahmasseby, 2009).

Segundo Vuchic (2005), o critério mais importante para o passageiro quando escolhe um modo de transporte é a viagem ter o menor tempo possível. O tempo de viagem depende da velocidade e da distância, que por sua vez dependem da geometria da linha ou via, das condições do trânsito e da complexidade da conexão (transbordos).

Um dos parâmetros principais do desempenho do sistema é a velocidade comercial, pois é oferecida ao passageiro. A velocidade comercial é a velocidade média de um veículo durante a viagem (Vuchic, 2005).

III.2 Desvio Espacial

Uma rede de transporte público, por muito extensa que seja, em geral não pode oferecer conexão entre todos os pontos de uma região. Desta forma, as agências utilizam o sistema de transbordos entre redes interdependentes, em que os passageiros realizam viagens através de conexões em pontos de transbordo que ligam diferentes redes, do mesmo modo ou de modos de transporte diferentes.

O sistema de transbordos pode tornar o serviço mais eficiente para os operadores, mas pode ser menos conveniente para os passageiros, dependendo das circunstâncias (Transportation Research Board, 2003c).

Do ponto de vista da oferta, a existência de redes interdependentes com pontos de conexão permitem ao operador concentrar a maioria dos utilizadores nas rotas principais, que estão ligadas por sua vez a rotas secundárias. Em geral, estes sistemas apresentam menores custos de operação, minimizam a energia consumida e o espaço ocupado, em relação a sistemas com serviços diretos entre todas as combinações de pontos da rede (Desautels, 2006). Estas redes exigem sistemas de coordenação do operador mais avançados e estações preparadas para a integração das várias redes (Guo & Wilson, 2011).

Por outro lado, podem estar associados alguns inconvenientes à existência de redes interdependentes, sobretudo quando é analisado o desempenho do sistema do ponto de vista do passageiro. Em primeiro lugar, o tempo de viagem pode ser maior neste tipo de redes, pois

o serviço não é tão direto e porque existe o tempo adicional de espera pela chegada do segundo veículo (tempo de transbordo). Além disso, os custos para o passageiro podem ser maiores com a existência de vários serviços interligados, dado que as agências podem cobrar diferentes tarifas em cada rede. A confiança no sistema também pode ser mais condicionada neste tipo de redes, dada a existência de diferentes veículos, com diferentes horários. Entre outros problemas, destaca-se também a perda de conforto dos passageiros que têm que fazer um transbordo (Desautels, 2006).

Dentro dos indicadores de conectividade, podem destacar-se os indicadores de acessibilidade a destinos, que verificam se dois pontos no espaço estão fisicamente conectados por um sistema de transporte, permitindo o deslocamento entre eles. Neste caso a conectividade pode ser dada pelo número de zonas conectadas diretamente a esta zona pelo sistema de transporte.

Ingram, em 1971, propõe um indicador de conectividade espacial que depende da distância média de cada ponto em relação a todos os pontos, dado por:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n}$$

Em que A_i é a acessibilidade da zona i , d_{ij} a distância entre as zonas i e j e n o número total de zonas (Cardoso, 2006).

IV. Capacidade

De forma a corresponder à procura existente, sem atrasos ou baixo nível de conforto, o operador deve oferecer um sistema com adequada capacidade (Vuchic, 2005).

No contexto de transportes públicos, a capacidade é um indicador qualitativamente mensurável e podem existir diferentes indicadores de capacidade do sistema de transporte: *person capacity*, *passenger capacity*, capacidade da estação, capacidade de veículos, e rácio volume capacidade (Transportation Research Board, 2003a).

Person capacity reflete o número de pessoas que uma facilidade ou uma rota de transporte pode servir num dado período de tempo (em geral passageiros por hora) e é determinado, teoricamente, pelo produto entre a capacidade do veículo e a frequência, mas é influenciada por muitos outros fatores (Orth & Nash, 2012). *Passenger capacity* diz respeito ao número máximo de passageiros que podem ser transportados numa dada secção num determinado período de tempo, em geral vem em passageiros por hora (Transportation Research Board, 2003a). Um passageiro é contabilizado duas vezes se tiver de fazer um transbordo, mas é só uma pessoa. Então, se existir uma rede com muitos transbordos, são transportados muitos passageiros, mas podem ser poucas pessoas diferentes.

A capacidade da estação é dada pelo número de pessoas servidas num período pelos diferentes elementos da estação. Também é possível analisar-se o sistema de transportes em termos de capacidade de veículos, ou seja, avaliando o número máximo de veículos que podem circular na rede (*Highway Capacity Manual*, 2000). Por fim, o rácio volume capacidade indica que parte da capacidade está a ser usada (Transportation Research Board, 2003a).

2. CONFORTO e CONVENIÊNCIA

Os passageiros procuram viagens com conforto, tanto no que respeita o conforto do veículo, como do ambiente envolvente e das estações. Este parâmetro depende de vários aspetos distintos como da saturação a bordo, isto é, da quantidade de passageiros no veículo, da existência de lugares sentados disponíveis, confortáveis e limpos, da temperatura do veículo, da condução adequada do motorista, do ruído. Para medir o conforto de um sistema de transporte público, frequentemente utiliza-se o nível de saturação dentro do veículo (Eboli & Mazzulla, 2012).

O número de passageiros a bordo reflete o nível de conforto do ponto de vista dos passageiros. Na presença de baixos níveis de serviço, o operador pode aumentar a frequência do serviço, a dimensão e a capacidade do veículo, diminuindo a saturação a bordo e melhorando o nível de conforto. Um elevado número de passageiros a bordo pode implicar uma velocidade menor e, juntamente com a entrada e saída dos veículos mais demorada, resultam maiores tempos de viagem e, por vezes, menor confiança no sistema. Além disso quando os passageiros estão de pé, é mais difícil para eles usarem o tempo de viagem de forma produtiva, anulando essa vantagem do uso de transporte público em detrimento de carro privado (Transportation Research Board, 2003c).

Segundo o TCRP Report 100 (Transportation Research Board, 2003c), o conforto pode ser medido através de dois indicadores: um fator de carga, dado por passageiros por assento, quando todos os passageiros têm lugar sentado disponível, ou pela área de passageiros em pé, quando há passageiros em pé ou quando o veículo está desenhado para acomodar mais passageiros de pé do que sentados. Em certos casos, quando um número substancial de utilizadores possuem objetos consigo, como malas por exemplo, o espaço ocupado por passageiro é maior e pode-se utilizar o conceito de número de passageiros equivalente, baseado em áreas definidas.

Vuchic (2005) apresenta alguns fatores que influenciam a conveniência de um sistema de transporte público, destacando a existência de várias alternativas de transporte, como a regularidade do horário, que ajuda os passageiros a memorizarem-no, a existência de estacionamento para automóveis nas estações, a possibilidade dos passageiros realizarem tarefas como ler ou escrever durante o transporte, a facilidade em obter informações precisas

sobre o transporte e as facilidades para pessoas com deficiência. O autor apresenta um quadro que relaciona a densidade de passageiros com o nível de conforto (Quadro 6).

Densidade [pass/m ²]	Área por passageiro [m ² /pass]	Condições dos passageiros
<1	>1.00	Passageiros independentes com facilidade de circulação
2-3	0.50-0.33	Algum contacto entre passageiros e circulação interfere com os restantes passageiros
4	0.25	Muito contacto entre passageiros, dificuldade de circulação
5	0.20	Congestionamento de passageiros e muita dificuldade de circulação
6.7	0.15	Congestionamento alto, possibilidade de acidentes

Quadro 6 - Níveis de conforto num transporte público (Vuchic (2005))

3. SEGURANÇA

A segurança dos transportes públicos relaciona-se com a existência de acidentes viários e com a segurança em termos da não ocorrência de crimes ao se utilizarem os transportes públicos, seja dentro do veículo ou numa paragem. O primeiro aspeto pode ser prevenido através de veículos seguros que permitam uma entrada e saída de passageiros com facilidade, de estações com design adequado, entre outros (Vuchic, 2005). O segundo pode ser minimizado pelas agências na escolha de uma localização segura para as infraestruturas, assim como a existência de oficiais de segurança, de câmaras de vigilância e de telefones de emergência (Transportation Research Board, 2003c).

Na literatura existem numerosos indicadores que avaliam o grau de segurança de um sistema de transporte público. Neste capítulo destacam-se os enunciados pelo Transportation Research Board (2003a), a taxa de acidentes, o número de incidentes de vandalismo, a taxa de criminalidade, a percentagem de veículos com dispositivos de segurança e o grau de policiamento.

A taxas de acidentes e as taxas de criminalidade são, em geralm divididas em diferentes categorias, dependendo da gravidade do acidente. A taxa de acidentes é o numero de acidentes por quilómetro de viagem, por horas de serviço ou outro período de tempo ou por passageiros. A taxa de criminalidade contra passageiros pode ser dada por passageiro-quilómetro ou por veículo-quilómetro. Além destes indicadores, Litman (2013) apresenta outros dois, a exposição humana a poluentes perigosos e a porção de viagem a pé ou de bicicleta expostos e Meyer (2000) refere o tempo de resposta a acidentes, o indicador de perceção de segurança por parte do utilizador e o índice de risco de acidentes.

4. CUSTO

Os custos dos transportes públicos englobam distintas perspectivas associadas a tipos de custos diferentes. Por um lado, o operador preocupa-se com os custos de implementação e custos de operação e manutenção do dia a dia. Por outro lado, os utilizadores têm em conta o custo de utilização de cada viagem e as autoridades e os políticos os custos totais, incluindo os custos ambientais (Lem et al., 1994).

Do ponto de vista do operador podem existir indicadores de custo-eficiência, que medem os recursos despendidos como o trabalho, dinheiro ou combustíveis em relação ao serviço produzido em termos de horas-veículo ou quilómetro-veículo, ou como as melhorias na confiança do sistema, e indicadores de custo-eficácia que analisam os recursos despendidos em relação ao nível de consumo do serviço, em termos de passageiros, passageiros-quilómetros ou de resultados operacionais (Fielding, 1985).

O custo de uma viagem de transporte público para os passageiros pode ser medido tanto em termos de unidade monetária por viagem como por ano, dependendo do tipo de análise que se pretende desenvolver (Vuchic, 2005). Na maioria dos casos os transportes públicos apresentam menor custo para os utilizadores do que o uso de carro privado, por isso o custo não é um fator determinante na escolha entre os diferentes modos, à exceção dos passageiros com reduzidas capacidades monetárias (Eboli & Mazzulla, 2012).

Do ponto de vista da sociedade, é necessário fazer-se uma análise isolada do custo de investimento do sistema, dado que a maior parte dos investimentos na área dos transportes públicos são realizados pelo governo e por isso a comunidade é diretamente afetada (Vuchic, 2005).

Os indicadores de desempenho relacionados com o custo do sistema podem ter numerosas limitações, que devem ser tidas em conta na avaliação de desempenho entre diferentes modos. Salienta-se, em primeiro lugar, a necessidade de incluir neste tipo de indicadores tanto os custos operacionais como os custos de capital, como já foi referido. Assim, a comparação de custos entre diferentes modos deve ser ponderada entre estes dois tipos de custos, dando-se uma importância relativa a cada um, isto é, sabendo à partida que um modo de transporte pode vir a ser o mais económico em termos de custos operacionais, mas ao mesmo tempo o mais dispendioso em termos de custos de capital. (Lem et al., 1994).

As emissões dos transportes públicos de gases contribuintes para o efeito estufa contribuem também para os custos totais. O custo das emissões é dado pelo *Social Cost of Carbon*(SCC) e o seu valor é, em média 18€ por tonelada de CO₂ (Bergh, 2013).

No quadro seguinte apresentam-se os valores médios dos custos de operação, manutenção e implementação dos diferentes modos em estudo. Os custos de infraestrutura do sistema de autocarros não foram contabilizados.

	BRT	LRT	BUS	METRO
Custo de operação	1,06 €/veh-km	1,36 €/veh-km	0,75 €/veh-km	0,51 €/pass-km
Custo de manutenção	2702,04 €/day-line	9857,64 €/day-line	11324,55 €/veh	
Custo de infraestrutura (€milhões/Km)	1,51	16,61	–	58,69
Custo do veículo (€milhões/veh)	0,47	2,63	0,23	6,61

Quadro 7 - Custos de diferentes modos de transporte (Macário et al., 2012)

5. FLEXIBILIDADE

A flexibilidade é um parâmetro do operador que indica a facilidade de adaptação de um sistema a eventuais problemas ou alterações inesperadas. A flexibilidade pode ser referida em termos espaciais, através de indicadores como os graus de liberdade de movimento, a flexibilidade da forma, o número de terminais, a extensão da rede, entre outros. Além disso, pode também ser classificada como flexibilidade temporal, indicando a possibilidade de alteração do sistema através do tempo ou como flexibilidade operacional, englobando a flexibilidade das rotas, de capacidade, de programação e tipo de controle (Vuchic, 2005).

A flexibilidade está quase sempre conectada com outros parâmetros e, por vezes, um sistema flexível pode ser um sistema ineficiente. Por isso, numa avaliação de desempenho, os indicadores relacionados devem ser todos contabilizados (Vuchic, 2005).

6. IMPACTOS AMBIENTAIS

Os sistemas de transportes afetam o ambiente envolvente de diversas formas, através da poluição atmosférica, da emissão de resíduos, de ruído, consumo de energia e do espaço necessário para a infraestrutura e de acesso ao serviço, entre outros (OECD, 1999).

IMPACTO:	INDICADOR:
Poluição atmosférica	> Número total de emissões de Dioxido de Carbono (CO ₂), Monoxido de Carbono (CO), Oxido de Nitrogénio (NO _x), componentes organicos voláteis i(SO ₂)
	> Percentagem de emissões em relação às emissões totais realizadas pelo homem
	> Intensidade de emissões per capita ou por unidade de PIB
	> Intensidade de emissões por unidade de volume de tráfego (ex: veh-km)
Produção de resíduos	> Taxas de produção de resíduos

	> Taxas de reciclagem de resíduos
Ruído	> Taxas de população expostas a ruído maior ou superior a 65db
Consumo de energia	> Consumo de energia final por modo de transporte
	> Contribuição relativa do mesmo para o consumo de energia total

Quadro 8 - Indicadores de desempenho: impactos ambientais de um sistema de PT (OECD, 1999)

No Quadro 8 está representada a síntese dos indicadores propostos num artigo da Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico (OECD). Neste documento salienta-se o facto dos indicadores referidos não terem como objetivo dar uma imagem completa de todas as relações entre o transporte e o meio ambiente, mas pretendem revelar tendências e ajudar a salientar fenómenos que exigem novas análises e medidas de ação.

RESUMO

No Quadro 9 apresenta-se um resumo das medidas de desempenho abordadas anteriormente de acordo com os diferentes pontos de vista que intervêm no processo de decisão de um sistema de transporte público.

PASSAGEIRO	OPERADOR	COMUNIDADE
<ul style="list-style-type: none"> • Proximidade • Frequência • Duração do serviço • Confiança • Tempo de Viagem • Desvio Espacial • Conforto • Segurança • Preço 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura da rede • Confiança • Velocidade • Capacidade • Flexibilidade • Segurança • Custo total • Atração de passageiros 	<ul style="list-style-type: none"> • Externalidades • Confiança • Objectivos sociais • Impactos ambientais

Quadro 9 - Medidas de desempenho segundo os pontos de vista do passageiro, do operador e da comunidade

II.3 BRT, LRT, Autocarro e Metro

Para realizar um adequado planeamento de transportes é necessário aprofundar o estudo dos diferentes tipos de exploração, as suas principais características e os seus padrões de procura. Neste capítulo é feito um resumo da revisão bibliográfica dos sistemas de Bus Rapid Transit (BRT), Light Rail Transit (LRT), Autocarro (BUS) e Rail Rapid Transit ou Metro.

II.3.1 Caracterização dos modos de transporte

Antes de se proceder à caracterização de cada um dos modos de transporte referidos anteriormente, destacam-se as categorias que os distinguem, descritas por Vuchic (1981), que defende que cada modo de transporte é definido por três características principais: Tipo de prioridade do sistema, Tecnologia e Tipo de serviço.

Tipo de prioridade do sistema:

Segundo Vuchic, existem três categorias principais (C, B e A) no que diz respeito ao tipo de prioridade, ou seja, ao grau de separação do sistema do restante tráfego.

A **categoria C** inclui os sistemas que operam em vias de superfície com tráfego misto. Nestes sistemas poderá haver priorização do sistema através de faixas prioritárias para o transporte público.

A **categoria B** representa os tipos de sistemas de transportes que estão fisicamente separados do restante tráfego, mas com a possibilidade de vias de cruzamento para outros veículos ou peões, como é o caso dos sistemas Light Rail Transit, que serão abordados mais à frente.

Por fim, a **categoria A** são os sistemas de transportes que operam em vias exclusivas, sem qualquer acesso para outros veículos ou peões. Estes sistemas utilizam artérias específicas e sistemas de túneis para poderem estar isolados do restante tráfego.

De uma forma geral, as características dos diferentes modos estão relacionadas com as categorias conforme o quadro que se apresenta em seguida.

Categoria	C	B	A
Características			
Desempenho do sistema	Moderado	Alto	Muito Alto
Custos de investimento	Baixo	Alto	Muito Alto
Imagem do sistema	Moderada	Forte	Muito forte
Impacto na forma urbana	Fraco	Forte	Muito forte

Quadro 10 - Características dos modos de transporte de acordo com as diferentes categorias (Vuchic, 1981)

Tecnologia:

Os diferentes modos diferem no que diz respeito à tecnologia utilizada. Os principais aspectos relativos à tecnologia do veículo dizem respeito ao tipo de condução e ao tipo de propulsão do veículo.

Os veículos podem ser controlados por um condutor ou podem ser fisicamente dirigidos por sistemas *guideway*, que utilizam carris para orientar o veículo. No primeiro caso, os sistemas podem operar em todos os tipos de vias, e os custos de investimento necessários são praticamente todos relacionados com os veículos e com as pequenas infraestruturas necessárias. Estes sistemas são mais flexíveis e têm uma cobertura maior do que os sistemas *guideway* que, por sua vez, apresentam em contrapartida uma maior atração de passageiros, por terem um desempenho melhor.

A maior parte dos sistemas de transportes públicos são construídos por veículos que utilizam motores de combustão interna, em geral a diesel, ou veículos com motores elétricos. A tração a diesel requer menos investimento mas apresenta um pior desempenho do que os motores elétricos.

Tipo de serviço:

Os tipos de serviço de transporte público podem ser classificados em **tipos de viagens, horários e tipos de operação** ou por **tempo de operação**.

Em relação ao tipo de viagens, Vuchic distingue o transporte a baixas velocidades dentro de pequenas áreas específicas, como aeroportos, ou centros de negócio, o transporte urbano, que inclui as viagens que servem toda a cidade e o transporte regional, que consiste em viagens a alta velocidade entre diferentes regiões urbanas.

Os horários e os tipos de operação dos serviços prestados pelos diferentes modos de transporte podem ser classificados em serviços locais, em que o sistema para em todas as paragens, requeridas pelos passageiros, em serviços rápidos, em que a unidade de trânsito salta algumas paragens previamente determinadas no horário e em serviços expresso, onde os veículos param apenas em algumas estações, significativamente espaçadas entre si.

Por fim, a classificação por tempo de operação considera três tipos de serviço, o regular, que opera a maior parte do dia, o de hora de ponta e o serviço especial em situações irregulares ou de emergência.

II.3.2 BRT e BHLS

O interesse em tirar maior aproveitamento do uso de autocarros, não limitado a um serviço que alimenta uma rede ferroviária, mas também como principal meio de transporte público, tem aumentado a nível mundial (Hensher & Golob, 2008).

Bus Rapid Transit (BRT) é um sistema completo de transporte de elevada capacidade e desempenho que apresenta flexibilidade e utiliza novas tecnologias mais convenientes para o utilizador, oferecendo serviços semelhantes aos de LRT ou metro mas a menores custos, e em alguns casos, como o TransMilenio em Bogotá, com maior capacidade (Transportation Research Board, 2003c). Um sistema BRT poderá custar entre quatro a 20 vezes menos do que um sistema LRT e entre 10 a 100 vezes menos do que um sistema de metro (Hensher & Golob, 2008).

A expressão BRT foi inicialmente utilizada em estudos nos Estados Unidos 1966 (WSA, 1966). Posteriormente foram sendo desenvolvidos sistemas de autocarros com melhores níveis de desempenho em Curitiba, Brasil, até ter sido implementado, nesta cidade, o primeiro sistema de BRT, em 1982 (Hidalgo & Muñoz, 2013).

Este modo de transporte tem sido atrativo para muitas agências de planeamento de transportes em todo o mundo, devido ao elevado nível de desempenho, o baixo custo e a rapidez e facilidade com que se implementaram os sistemas de BRT em Curitiba, Quito, Bogotá, Cidade do México, Pequim, Jakarta, Istambul, Los Angeles e sistemas de BHLS em Paris, Nantes, Amsterdão, entre outras (Hidalgo & Muñoz, 2013).

Atualmente (2014), cerca de 168 cidades em todo o mundo implementaram sistemas BRT ou sistemas de autocarros em corredores prioritários. A procura mundial deste tipo de sistemas é cerca de 31 milhões de passageiros por dia (Global Data BRT, 2014).

Em seguida são descritas as características principais dos sistemas de BRT:

Vias exclusivas facilmente identificadas, ou vias com prioridade através de sinalização, onde os veículos podem atingir maior velocidade comercial, e o sistema apresentar menores variabilidades no cumprimento de horário, menor efeito de *bunching* e conseqüentemente melhores níveis de confiança. A existência de vias exclusivas pode ser o elemento com maiores custos em todo o sistema BRT (US Department of Transportation, 2009). Os sistemas BRT classificam-se como categoria B, no que diz respeito à prioridade sobre o restante tráfego, conceito introduzido na secção anterior.

Estações modernas, com boa acessibilidade, com plataformas de fácil acesso, com elementos para segurança, em geral mais cómodas e atrativas do que as paragens de autocarros convencionais e bem integradas no ambiente envolvente, podendo integrar estações intermodais (United States Department of Transportation, 2009). Em geral o pagamento do serviço é realizado na estação, fora do veículo, aumentando a eficiência do

sistema (Hidalgo & Muñoz, 2013). Muitas estações BRT possibilitam a paragem de dois ou mais veículos em simultâneo, permitindo reduzir os headways dos sistemas. O espaçamento entre paragens varia entre 200 a 400 metros (Vuchic, 2005).

Veículos consistem numa unidade de transporte, com alta capacidade, sistema de pneus de borracha, com facilidades de entrada e saída do veículo e com condução confortável. Muitas agências utilizam veículos com design próprio, janelas largas como os veículos ferroviários, com sistemas de áudio e televisão a bordo e com níveis de emissões mais baixos do que os autocarros convencionais (Hidalgo & Muñoz, 2013). Os veículos BRT devem ser cuidadosamente selecionados consoante o mercado onde estão inseridos. O tipo de veículo influencia os tempos de viagem, a confiança do serviço, os custos de operação e de manutenção, os impactos no meio ambiente e a percepção que os passageiros têm do sistema (Transportation Research Board, 2003b). Um veículo BRT emite cerca de 506,4 gramas de CO₂ por km (Chen, Yu, & Wang, 2013).

Serviço frequente e com longa duração, com alta frequência, permitindo reduzir ou mesmo eliminar a necessidade de consultar horários. Em geral, os sistemas BRT são serviços de longa duração, de forma a ser possível a adequação aos diferentes tipos de passageiros (US Department of Transportation, 2009).

Percursos flexíveis: Um sistema BRT pode ser projetado para uma combinação diferente de locais, com serviços expresso de forma a melhorar certos serviços para os passageiros. Também poderá ter serviços combinados com uma parte num corredor central a maiores velocidades e outra parte num corredor secundário a menores velocidades, em que se utiliza o mesmo veículo, evitando transbordos, o que não acontece no caso de sistemas com Light Rail Transit (LRT) (Transportation Research Board, 2003c).

Informação e tecnologia: Várias aplicações de controle como a localização automática de veículos e sistemas de informação eficientes tanto nas estações como a bordo que indicam a chegada do veículo seguinte, o percurso, as estações seguintes, etc. (Transportation Research Board, 2003c).

Na Europa, em cidades como Paris ou Amesterdão, o conceito de BRT foi adaptado para sistemas de Autocarros com Alto Nível de Serviço, BHLS (Buses with High Level of Service). Este sistema é baseado nos autocarros convencionais, mas com níveis de conforto e desempenho mais elevados, como sistemas como o metro ou o LRT (Finn et. al, 2011). Uma das principais características deste sistema é o facto de terem prioridade sobre os outros modos, através da utilização de vias exclusivas ou partilhadas ou com semaforização. Os veículos BHLS apresentam alto nível de desempenho, são mais rápidos, têm um maior nível de confiança, maior conforto e são mais atrativos e do que os autocarros convencionais (Finn et al., 2010).

O sistema BHLS é mais flexível do que o sistema BRT, adaptando-se às situações culturais, sociais económicas e políticas de cada cidade europeia (Hidalgo & Muñoz, 2013). O sistema BHLS mais conhecido é o TVM (Trans-Val-de-Marne) em Paris, que tem uma capacidade para 66000 viagens por dia, velocidade comercial de 23km/h e headways de 3,5 minutos (Hidalgo & Muñoz, 2013).

O número de veículos e de passageiros que podem estar presentes em sistemas BRT pode variar significativamente, dependendo do tipo de prioridade das vias, do design das estações e das paragens, da dimensão dos veículos, do posicionamento das portas no veículo, dos métodos de tarifação e das características da procura. Da análise de vários sistemas BRT em diversos países sabe-se que quando os veículos operam em vias rápidas com prioridade e sem semaforização, com pontos de entrada bem programados e terminais adequados, o fluxo pode ir até 750 veículos por via por hora. Por outro lado, sistemas em vias secundárias no centro de cidades podem apresentar fluxos de 90 a 120 veículos por hora (Transportation Research Board, 2003b).

A capacidade dos veículos BRT e BHLS depende do número e do posicionamento das portas, podendo variar entre 80 a 290 lugares. A capacidade da linha varia entre 6000 a 24 000 passageiros por hora (Vuchic, 2005).

A velocidade operacional utilizada nestes sistemas pode variar desde os 20 aos 40 km/h.

II.3.2 LRT

Light rail transit (LRT) é um sistema ferroviário elétrico com elevada capacidade, que funciona à superfície e que têm prioridade sobre o trânsito regular (HCM, 2000).

O LRT caracteriza-se por ser versátil no que diz respeito às suas operações, podendo funcionar separado do restante tráfego ou juntamente com os restantes veículos na rede viária, operando tanto em artérias principais, como em tuneis ou em vias secundárias, podendo ser tanto de categoria C, B ou A. Porém, a categoria mais comum é a B, em que os veículos estão separados do restante tráfego mas podendo ter cruzamentos de veículos ou peões, em algumas zonas (Vuchic, 2005).

Os sistemas LRT podem ser diferentes entre si, distinguindo-se na dimensão e design das suas estações, no sistema tarifário utilizado, no comprimento da rede, na propulsão dos veículos, no nível de acesso e na relação com os outros modos, entre outros. Ao contrário do tráfego automóvel, o tempo de viagem de um sistema LRT varia pouco com o aumento do volume de passageiros. A capacidade do sistema depende das dimensões do veículo e das estações e do intervalo mínimo entre veículos (headway) (HCM, 2000). O headway mínimo num serviço LRT é 150 a 75 segundos. A frequência dos sistemas LRT varia, em geral, entre 6 a 20 veículos por hora.

Normalmente, os comboios LRT possuem no máximo quatro carruagens, para poderem operar nos centros das cidades sem causar grandes perturbações. Os veículos mais comuns são articulados, bi-direccionais, têm capacidade entre 250 a 350 lugares e têm 18 a 45 metros de comprimento, dependendo do número de carruagens.

A capacidade das linhas de LRT pode ir entre 5000 a 24000 passageiros por hora. A velocidade operacional depende da categoria do sistema, das condições de operação dos veículos e do espaçamento entre estações, variando em geral entre 20 a 40 km/h (Vuchic, 2005). O espaçamento entre estações LRT varia entre 250 a 600 m (Vuchic, 2002).

Em comparação com o sistema BRT, o LRT tem um melhor desempenho relativamente aos veículos utilizados, devido à tração elétrica e porque são considerados mais confortáveis, atrativos e espaçosos do que os de BRT. Além disso, o sistema LRT pode operar em túneis, produz menos ruído e é mais aceite em vias para peões do que autocarros BRT. Por outro lado, o sistema LRT tem a desvantagem de precisar de maiores custos de investimento, processos de construção e implementação mais complexos e mais lentos do que os sistemas de BRT. Outra desvantagem associada ao sistema LRT é o facto de não ter tanta acessibilidade como o BRT, exigindo mais transbordos. Por fim, o sistema LRT é considerado o que apresenta melhor desempenho ao nível do ruído emitido (Vuchic, 2005).

II.3.3 Autocarro convencional

O autocarro é o modo de transporte público mais utilizado em todo o mundo. Isto deve-se sobretudo à sua flexibilidade, ao facto de requerer uma tecnologia simples, aos baixos custos de implementação e de operação, quando comparados com outros modos. O impacto da sua implementação no espaço urbano é mais baixo do que os outros modos (Vuchic, 1981).

Existem diversos tipos de serviços de autocarros, desde os *minibuses*, com capacidade para 20 a 35 lugares, aos autocarros bi-articulados com mais de 125 lugares. Além destes e do serviço de autocarro convencional, existem outros sistemas de autocarro utilizados, destacando-se os autocarros expresso, que oferecem um serviço rápido, com percursos longos e estações significativamente espaçadas entre si, e os *trolleybuses*, cujo principal aspeto que os distingue é utilizarem um motor elétrico e obterem energia através de dois cabos suspensos ao longo da via (Vuchic, 1981).

O desempenho do sistema de autocarros varia consideravelmente com o tipo de operação e com a categoria. Existem autocarros de categoria C, como é o caso dos autocarros regulares, os *paratransit* e os *express bus*, que operam em vias com tráfego misto, de categoria B, no caso dos *guided bus* ou categoria A, no caso dos autocarros que circulam em vias exclusivas, sem cruzamentos com outros veículos (Vuchic, 1981).

O serviço de autocarro convencional, ou regular, consiste em autocarros que operam em rotas fixas segundo horários estabelecidos (Vuchic, 1981). A capacidade de um serviço de autocarros pode variar entre 3000 a 6000 passageiros por hora. Um autocarro pode apresentar variadas dimensões, tendo capacidade para 40 a 160 lugares. A frequência de um serviço pode variar entre 2 a 60 veículos por hora e o *headway* mínimo são 70 a 50 segundos. O espaçamento entre estações pode ser desde 80 a 250 metros (Vuchic, 2005).

O nível de confiança de um serviço de autocarros é medido através da percentagem de chegadas às paragens com menos de 4 minutos de atraso. Este nível varia muito com o trânsito que existe ao longo do percurso, que depende do congestionamento, das condições meteorológicas, entre outros. Por esta razão, a confiança de um serviço de autocarros é mais difícil de medir, comparativamente ao serviço de metro, por exemplo. Por outro lado, o desempenho de um sistema de autocarros em caso de emergência pode ser melhor do que um serviço de metro, pois os autocarros podem ser facilmente realocados, adaptando-se a cada situação (Vuchic, 2005). A segurança dos sistemas de autocarros varia substancialmente consoante o sistema, as condições do trânsito e o tipo de operação. Em geral, a segurança a bordo de um autocarro é bastante superior do que num carro privado e inferior ao serviço de metro e de LRT (Vuchic, 1981).

Segundo os dados da *International Association of Public Transport* (UITP), um autocarro regular emite 682,832 gramas de CO₂ por km (Chen et al., 2013).

II.3.4 Metro

O sistema Metro, também denominado RRT (Rail Rapid Transit), tem um forte impacto na mobilidade de uma população e na forma urbana de uma região (Vuchic, 2005).

O Metro é um sistema de categoria A que utiliza veículos ferroviários elétricos de alta capacidade e elevados níveis de aceleração e travagem. Comparativamente aos outros modos, o sistema Metro oferece maior velocidade, nível de confiança e segurança (Vuchic, 2005).

Além disso, a capacidade do sistema Metro é bastante mais elevada do que os outros modos, por apresentarem mais carruagens e estações maiores. Um Metro pode ter entre 4 a 10 carruagens, sendo que cada carruagem pode medir até 21 metros. A capacidade total de um Metro varia entre 600 a 2 400 lugares. A capacidade das linha pode variar entre 16 000 a 70 000 sps/h (Vuchic, 2005).

Atualmente os sistemas de Metro podem ser bastante variados, dependendo da zona e da procura. A extensividade da rede e a distância entre estações são distintas consoante o sistema se encontre em áreas urbanas densas no centro de uma cidade ou, pelo contrário, em linhas regionais, que apresentam menos estações e mais distanciadas do que no primeiro caso. Consequentemente, as velocidades operacionais variam, em geral, entre 25 a 35km/h. O tempo mínimo entre veículos consecutivos varia entre 150 a 120 segundos. A frequência máxima dos sistemas metro pode ir desde 6 a 30 veículos por hora.

É considerado o modo de transporte com melhor nível de desempenho em relação ao seu custo de operação por espaço-km. Contudo, um sistema Metro exige elevados investimentos e complexos processos construtivos, causando mais impactos durante a fase de construção, que é mais demorada do que no caso dos outros modos de transporte. Os custos de construção variam bruscamente consoante as condições locais .O sistema Metro não pode estar enquadrado em áreas pedestres (Vuchic, 2005).

II.4 Avaliação de desempenho: análise multi-critério

Planear um novo sistema de transportes ou avaliar o funcionamento de um serviço já existente exige uma análise completa baseada em indicadores que medem o desempenho do sistema, tanto do ponto de vista do operador, como do passageiro e da sociedade. Na avaliação do desempenho de um sistema de transportes públicos é difícil chegar a uma solução simples e inequívoca.

No capítulo II.2 estudaram-se os respetivos indicadores de desempenho. Na secção que se segue é feita uma revisão da literatura que aborda um método de avaliação de desempenho, a **Análise Multi-critério**, com o objetivo de perceber como estes indicadores podem ser quantificados e avaliados.

O método de análise multi-critério (MCA, *Multi-Criteria Analysis*) consiste numa análise comparativa de projetos alternativos ou medidas heterogéneas. Através deste método, são tidos em conta diversos critérios, em simultâneo, na análise de uma situação. Este método é semelhante à análise custo-benefício, embora não reduza os fenómenos díspares a uma base unitária (monetária) comum. A análise multi-critério tem em conta vários pontos de vista e é especialmente útil na formulação de conclusões sobre questões complexas. Pode ser aplicada com critérios de apreciação contraditórios ou quando for difícil a escolha entre os critérios.

O objetivo principal da MCA é combinar e estruturar as diferentes análises a ter em consideração no processo de tomada de decisão, sendo que a tomada de decisão se baseia em escolhas múltiplas e o tratamento dado a cada uma das escolhas condiciona, em grande medida, a decisão final. Desta forma, é possível analisar o raciocínio e as convicções subjetivas das diferentes partes interessadas sobre cada questão em particular.

A implementação da MCA pode ser dividida nas seguintes fases:

- 1. Definição dos projetos ou ações** sobre os quais será realizada a apreciação comparativa;
- 2. Definição dos critérios de apreciação**, que devem refletir as preferências dos decisores e os diferentes pontos de vista;
- 3. Análise dos impactos das ações** através de uma estimativa quantitativa ou de uma descrição qualitativa do impacto de cada projeto em termos destes critérios. Nesta fase deve ser elaborada uma matriz de avaliação multi-critério, com igual número de colunas e critérios e igual número de linhas e medidas a serem comparadas, em que cada célula representa a avaliação de uma medida por critério. Todas as medidas relativamente a todos os critérios devem ser avaliadas, ou seja nenhuma célula pode ficar vazia, mas não é necessário que todas as avaliações sejam feitas da mesma forma.

Em seguida descrevem-se os dois métodos mais utilizados na análise do impacto das ações.

3.1 Método de compensação

Consiste na atribuição de uma ponderação a cada critério e no cálculo de uma pontuação global para cada medida, sob a forma de uma média aritmética ponderada das pontuações atribuídas à medida em questão em relação aos diferentes critérios. O cálculo desta média ponderada possibilita a compensação entre critérios.

3.2 Método de prevalência (*outranking*)

Esta metodologia é aplicada quando todos os critérios não forem considerados comensuráveis, não sendo possível produzir uma pontuação global. Para analisar o impacto das diferentes ações, são comparadas medidas entre si, segundo um determinado ponto de vista, por exemplo: “a Medida A tem prevalência em relação à Medida B do ponto de vista do critério do ambiente?”. As respostas poderão ser sim ou não, ou podem ser qualificadas introduzindo as noções de “preferência fraca” e de critério limite.

Fase 4. Apreciação dos efeitos das ações em termos de cada um dos critérios selecionados

Nesta fase são avaliados os impactos da intervenção. Se for usado o método de compensação, atribuem-se pontuações e é feita uma análise simples com base numa folha de cálculo básica.

Fase 5. Agregação das apreciações e conclusões

Através de um software que ordene as ações entre si, é deduzido um único sistema de ponderação para os critérios. Um dos softwares desenvolvidos no âmbito da MCA deve-se aos autores Bana e Costa e J.-C. Vansnick, na década de 1990, e tem o nome de *MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)* (MACBETH, 2014). Trata-se de um software de análise multi-critério baseado em avaliações qualitativas tomadas pelo utilizador do sistema, que ordena diferentes opções por prioridades. Esta metodologia permite estruturar árvores de valores, desenvolver indicadores de critérios, análises de sensibilidade entre outros. (Bana e Costa et al, 2003)

O ponto forte da análise multi-critério é o facto de permitir ter em linha de conta os valores e as opiniões individuais de vários atores, e processar as relações funcionais dentro de uma rede complexa, de forma quantitativa. A principal desvantagem desta técnica é que pode contribuir para o estabelecimento de um compromisso ou de uma “coligação” de pontos de vista, sem definir conclusões individuais ou coletivas dos parceiros. Os decisores políticos preferem abordagens deste tipo, uma vez que estão envolvidos no processo, tendo este uma base técnica relativamente simples. Adicionalmente, esta técnica nem sempre é usada de uma forma interativa, como deveria ser, e por vezes tende a fixar critérios que são, na realidade, instáveis (ADC, 2014).

Este método é adequado à avaliação de PT dado os seus múltiplos objetivos, muitas vezes em conflito entre si, e por ser um processo em que os atributos têm pesos relativos diferentes no processo de tomada de decisão. De forma a atribuir os diferentes pesos aos atributos, o problema é subdividido em sub-problemas e deve-se estabelecer uma hierarquia entre estes. Muitas vezes a tarefa de recolha e análise de dados torna-se difícil devido às limitações a nível de recursos, tempo e conhecimento, sendo necessário utilizar hipóteses simplificativas ou parâmetros padrão. Concluindo, a análise multi-critério reconhece que no mundo real, a tomada de decisões dificilmente se baseia num só critério, sendo necessário ter em consideração os vários objetivos ou indicadores, mesmo que compitam entre si (Ferreira & Lake, 2002).

II.5 Conclusões

Neste capítulo foi feita uma revisão da literatura existente sobre os indicadores de desempenho de um sistema de transportes públicos, apresentaram-se os diferentes modos de transporte considerados neste estudo e analisaram-se vários métodos de avaliação destes indicadores.

As medidas de desempenho avaliam um aspeto específico de um serviço de transportes e podem ser mensuradas através de vários indicadores. Podem representar aspetos qualitativos, como o conforto do sistema ou aspetos quantitativos como a duração do serviço. Não existe um conjunto universal de indicadores de desempenho, estes variam com o estudo em causa e com a entidade que o realiza. Os indicadores escolhidos para um estudo de um sistema de transportes devem ser definidos corretamente permitindo uma simples compreensão, devem utilizar informação acessível e repetível.

Na literatura foram encontradas diferentes classificações das medidas de desempenho. Neste capítulo foram feitas as distinções entre os pontos de vista económico, social e ambiental, entre medidas de eficiência e medidas de eficácia e por fim entre os pontos de vista dos passageiros, do operador e da comunidade. Na descrição de cada medida de desempenho estudada, optou-se por destacar o último critério (passageiros, operador e comunidade), pois tornou mais fácil a organização dos diferentes indicadores com as respetivas medidas de desempenho.

Em suma, os passageiros esperam um serviço de qualidade, com curtos tempos de viagem e boa frequência de serviço, com o menor número possível de transbordos e um preço aceitável. Os operadores e as agências pretendem promover este tipo de serviço de uma forma economicamente eficiente.

Em seguida, no Quadro 11 apresenta-se uma síntese das medidas e indicadores de desempenho estudados neste capítulo.

Notou-se que várias medidas são comuns a dois dos grupos ou mesmo aos três. Para uma correta análise, todos os requisitos destes grupos devem ser considerados em conjunto, de forma a proporcionar um sistema de transporte público com um serviço adequado para todos. Este compromisso poderá ser uma das principais dificuldades que se pode esperar no planeamento de transportes, pois conclui-se que, tendo em conta o mesmo valor de um indicador, pode ser considerado um sistema com bom desempenho do ponto de vista dos passageiros mas com mau desempenho, pelo contrário, segundo os interesses do operador. Por exemplo, se um operador de transportes aumentar o tamanho da frota, melhorando a frequência do serviço, aumentará a satisfação dos passageiros. Porém, poderá levar a uma má opção do ponto de vista económico para o operador, caso não aumente a procura do serviço.

	Medida de desempenho	Ponto de vista	Indicador - Descrição	Unidade	
ACESSIBILIDADE	1. Proximidade	Passageiro	Tempo entre o local de origem/destino e a paragem	minutos	
	2. Cobertura de rede	Operador	Área cujo tempo de acesso a pé até à estação é no máximo x	km ²	
	Disponibilidade Temporal	3. Frequência	Passageiro	Número de veículos que passam na paragem por hora	veh/h
		4. Duração do serviço	Passageiro	Número de horas que é prestado o serviço num dia	horas/dia
		5. Confiança do Passageiro	Passageiro	Variabilidade dos headways entre veículos sucessivos.	minutos
		6. Confiança do Operador	Operador	Tempo médio ou distância média entre falhas no sistema	minutos
		7. Confiança da Comunidade	Comunidade	Serviços básicos em caso de emergência	
		8. Tempo de viagem	Passageiro	Soma do tempo de acesso até à paragem, do de espera, a bordo do veículo, transbordo e saída	minutos
	Conectividade	9. Velocidade	Operador	Velocidade cruzeiro	km/h
		10. Desvio Espacial	Passageiro/ Operador	Diferença entre a distancia real e a percorrida usando o sistema	km ou metros
		11. Transbordos	Passageiro/ Operador	Número de transbordos	-
		12. Conectividade espacial	Passageiro	Distância média de cada ponto em relação a todos os pontos	km ou metros
	Capacidade	13. Capacidade	Operador	Número máximo de passageiros que podem ser transportados numa dada secção	pass/veh
		14. Taxa de ocupação	Operador	Rácio entre o volume e a capacidade	-
CONFORTO	15. Conforto do passageiro	Passageiro	Fator de carga: passageiros por assento, quando todos os passageiros têm lugar sentado disponível	-	
		Passageiro	Área de pax em pé, quando há pax em pé ou quando o veículo está dimensionado para acomodar mais passageiros de pé do que sentados.	pax/veh	
	16. Conveniência	Passageiro	Possibilidade dos passageiros realizarem tarefas como ler ou escrever, facilidades para deficientes, etc	-	
SEGURANÇA	17. Segurança acidentes	Passageiro	Taxa de acidentes: nº de acidentes por km de viagem, por passageiro, por horas de serviço ou outro período de tempo	acidentes/h	
	18. Segurança crimes	Passageiro	Número de crimes contra passageiros	pass-km veh-km.	
CUSTO	19. Custo de utilização	Passageiro	Custo de utilização do sistema por parte do passageiro	€/viagem €/ano	
	20. Custo de implementação	Operador/ Comunidade	Custo de infraestrutura e custo de material circulante	€/km €/veh	
	21. Custo de manutenção	Operador	Custo de manutenção	€/dia-linha	
	22. Custo de operação	Operador	Custo de operação	€/km €/pass.km	
	23. Custo ambiental	Comunidade	Custo por unidade de CO ₂ emitida	€/ton CO ₂	
	24. Custo total	Operador/ Comunidade	Custos totais	€	

25. Flexibilidade		Operador/ Comunidade	Flexibilidade temporal (alteração do sistema através do tempo ou flexibilidade operacional (flexibilidade das rotas, de capacidade, etc.))	-
IMPACTOS AMBIENTAIS	27. Poluição atmosférica	Comunidade	Número total de emissões	goe/pass.k m
	28. Produção de resíduos	Comunidade	Taxas de produção de resíduos	-
	29. Ruído	Comunidade	Taxas de população expostas a ruído maior ou superior a 65db	-
	30. Consumo de energia	Comunidade	Consumo de energia final por modo de transporte	
	31. Consumo de energia	Comunidade	Contribuição relativa do mesmo para o consumo de energia total	-

Quadro 11 - Medidas e Indicadores de desempenho de um sistema de transporte público

Neste trabalho não foram considerados alguns destes indicadores na elaboração do modelo de simulação. Em seguida, são identificados no Quadro 12 os indicadores utilizados e faz-se uma breve explicação da razão para a eliminação dos restantes.

Medida de desempenho		Ponto de vista	Indicador - Descrição	Unidade
ACESSIBILIDADE	1. Frequência	Passageiro	Número de veículos que passam na paragem por hora	Vec/h
	2. Tempo de viagem	Passageiro	Soma do tempo de acesso até à paragem, do de espera, a bordo do veículo, transbordo e saída	minutos
	3. Velocidade	Operador	Velocidade cruzeiro	Km/h
	4. Capacidade	Operador	Número máximo de passageiros que podem ser transportados	pax/veh
	5. Taxa de ocupação	Operador	Rácio entre o volume e a capacidade	-
6. Conforto		Passageiro	Taxa de ocupação máxima	-
CUSTO	7. Custo de utilização	Passageiro	Custo de utilização do sistema por parte do passageiro	€/viagem €/ano
	8. Custo de implementação	Operador/ Comunidade	Custo de infraestruturas e custo de material circulante	€/km €/veículo
	9. Custo de manutenção	Operador	Custo de manutenção	€/dia-linha
	10. Custo de operação	Operador	Custo de operação	€/km €/pass.km
	11. Custo ambiental	Comunidade	Custo por unidade de CO ₂ emitida	€/ton CO ₂
	12. Custo total	Operador/ Comunidade	Custos totais	€
13. Poluição atmosférica		Comunidade	Número total de emissões	goe/pass.k m

Quadro 12 - Indicadores de desempenho a serem analisados no modelo de estudo

A Proximidade e a Cobertura foram consideradas no modelo, porém como neste estudo são constantes, isto é, como se optou manter um valor igual para todas as distâncias entre zonas e paragens, que será explicado no próximo capítulo, não foram consideradas indicadores. A Duração do serviço também não foi um dos indicadores de avaliação de desempenho deste modelo, pois foram consideradas apenas duas horas do dia.

As medidas de desempenho de confiança no sistema estudadas não foram consideradas neste modelo, pois, como se manteve a frequência fixa no modelo, não se previa praticamente

variabilidade dos *headways* entre veículos consecutivos. Além disso, não foram avaliadas as falhas e as emergências do sistema de transportes.

O Desvio Espacial foi considerado constante no modelo de simulação e não foram avaliados os Transbordos nem a Conectividade Espacial pois o estudo foi feito apenas para um corredor, ou seja, não há Transbordos e a Conectividade é fixa. O Conforto do passageiro foi avaliado através da taxa de ocupação máxima do veículo e a Conveniência, a Segurança de acidentes, a Segurança de crimes e a Flexibilidade do sistema não foram considerados neste estudo.

Em relação aos custos, foram tidos todos os custos em conta exceto o custo do passageiro, pois considerou-se que o passageiro escolheria o sistema de transportes sempre, independentemente do modo. Por fim, no que diz respeito aos impactos ambientais e consumos de energia, foram apenas consideradas as emissões de CO₂.

Os modos de transporte público distinguem-se segundo três aspetos principais, o tipo de prioridade do sistema, a tecnologia dos veículos e o tipo de serviço. Foram estudados quatro sistemas de transporte público, o Bus Rapid Transit (BRT) o Autocarro (BUS), o Light Rail Transit (LRT) e o metro (METRO), cujas características principais se resumem no Quadro 13.

PARÂMETROS	MODOS DE TRANSPORTE			
	BRT	LRT	BUS	METRO
Categoria*	B	B (C ou A)	C (B ou A)	A
Frequência [veh/h]	6 a 20	6 a 20	2 a 10	6 a 30
Headway mínimo [s]	150 a 75	150 a 75	70 a 50	150 a 120
Capacidade total do veículo [pass]	80 a 290	250 a 350	40 a 160	600 a 2400
Capacidade da linha [pass/h]	6000 a 24000	5000 a 24000	3000 a 6000	16000 a 70000
Velocidade operacional [km/h]	15 a 30	15 a 30	8 a 20	25 a 45
Espaçamento entre paragens [m]	200 a 400	250 a 600	80 a 250	200 a 750
Emissões CO₂ (g/ km)	506,1		682,8	

Quadro 13 - Principais características dos modos de transporte (Chen et al., 2013), (Vuchic, 2005)

*categoria de acordo com a prioridade do sistema sobre o restante tráfego (C: tráfego misto em vias de superfície; B: sistemas fisicamente separados do restante tráfego, com vias de cruzamento para outros veículos ou peões; A: sistemas em vias exclusivas, sem acesso para outros veículos ou peões)

Foi estudada a Análise Multi-critério para a avaliação do desempenho do corredor de transportes públicos, de forma a se puderem considerar indicadores distintos e mensuráveis de diferentes dimensões que afetam o seu desempenho (conforto, custos, taxas de ocupação, etc.)

III. Modelo de Simulação

Neste capítulo pretende-se desenvolver e testar um modelo de simulação, desenvolvido com apoio do programa *Anylogic*.

O modelo tem como objetivo avaliar o desempenho de diferentes modos de transporte num corredor de transporte público.

A simulação integrará o comportamento estocástico da procura (chegadas a paragens e pares OD), as características de operação de cada modo de transporte (tempo de viagem, capacidade, frequência, velocidade comercial) e as condições de tráfego.

A estrutura deste capítulo é apresentada em seguida:

III.1. Apresentação dos principais conceitos utilizados na elaboração do modelo;

III.2. Definição da estrutura do modelo;

III.3. Descrição da construção do protótipo, apresentação dos parâmetros utilizados e descrição dos testes realizados;

III.4 Apresentação de resultados recolhidos no modelo de simulação;

III.5 Análise de desempenho com base nos resultados recolhidos no modelo de simulação;

III.6 Apresentação das principais conclusões do capítulo;

III.1 Apresentação dos conceitos principais utilizados na Simulação

III.1.1 Modelação Matemática e Simulação

Um modelo é uma representação simplificada de uma parte do mundo real, o sistema de interesse, que se baseia em alguns elementos importantes para a sua análise, a partir de um determinado ponto de vista (Ortúzar & Willumsen, 2001).

Modelação é a tarefa de produzir um modelo, permitindo ao analista prever os efeitos que uma alteração provocará no sistema. A complexidade de um modelo deve ser tida em consideração na medida em que este deve incorporar os aspetos principais do sistema a representar, tentando-se aproximar o mais possível deste mesmo, mas sem ser complexo demais para que se torne impossível experimentá-lo e entendê-lo (Maria, 1997).

Um dos aspetos principais na modelação de um sistema é a validação do modelo. Existem várias técnicas de validação, incluindo a simulação do mesmo baseada em *inputs* das condições do sistema real conhecidas e na análise dos *outputs*. Os modelos matemáticos podem ser classificados em determinísticos, quando os inputs ou outputs são variáveis com valores fixos ou estocásticos, quando pelo menos uma das variáveis é probabilística. Por outro lado, os modelos também podem ser divididos em Dinâmicos ou Estáticos, quando são tidas em conta ou não as variações do fator tempo nas variáveis, respetivamente. Em geral, os modelos de simulação são estocásticos e dinâmicos (Maria, 1997).

A simulação é uma técnica de modelação onde os modelos podem ser experimentados e reconfigurados de forma a testar situações que seriam difíceis ou mesmo impossíveis de testar na vida real. Por outras palavras, simulação é uma ferramenta que avalia o desempenho de um sistema, existente ou por implementar, testando diferentes configurações a avaliar, de forma a otimizar o desempenho do sistema ou a prever algumas situações, reduzindo a possibilidade de falha do sistema real (Maria, 1997).

Anu Maria (1997) propõe os seguintes passos no desenvolvimento de um modelo de simulação:

1. Identificação e formulação do problema;
2. Recolha e processamento de dados;
3. Formulação e desenvolvimento do modelo;
4. Validação do modelo;
5. Registo e explicação do modelo para usos futuros;
6. Definição das configurações experimentais;
7. Correr o modelo;
8. Apresentação e interpretação de resultados;
9. Identificar futuras abordagens.

A modelação de um sistema através da simulação permite entender o desenvolvimento de um sistema de interesse, testar hipóteses sobre a sua validade, comprimir tempo de forma a observar certos fenómenos que acontecem durante um longo período de tempo, analisando-os em detalhe. Além disso possibilita o teste de várias alterações de carácter operacional, organizacional, ambiental, entre outros, sem ser necessário alterar o sistema real, reduzindo os riscos de falhar (Maria, 1997).

III.1.2 Teoria de Filas de Espera

O modelo construído para representar um sistema de transporte baseou-se na Teoria das Filas de Espera, em que os **clientes**, vão chegando, esperam por um determinado **serviço**, caso não sejam atendidos imediatamente e saem do sistema após terem usufruído do serviço.

A teoria de filas de espera baseia-se em análises matemáticas precisas que estudam as propriedades das filas, prevendo modelos que explicam o comportamento de um sistema. Os modelos de filas de espera ajudam a tomada de decisões relativamente à configuração do sistema e ao dimensionamento do serviço. O principal objetivo destes modelos é otimizar o funcionamento do sistema em estudo procurando soluções equilibradas e evitando situações extremas de rarefação e de congestionamento. No caso de rarefação, existem poucos clientes em relação à capacidade dos servidores, de tal modo que estes permanecem inativos durante algum tempo. Por outro lado, os casos de congestionamento representam situações em que, em geral, os clientes têm de esperar demasiado tempo para serem atendidos.

A estrutura de um problema de filas de espera é formada por três componentes, a **população ou fonte**, onde são gerados os clientes, a **fila de espera**, constituída pelos clientes que estão à espera de ser atendidos e o **serviço ou atendimento**. O conjunto formado pela fila de espera e o serviço denomina-se **sistema**. É necessário ter em conta as características de cada uma destas componentes para se definir o problema corretamente.

A chegada dos clientes, através da fonte, é caracterizada por cinco aspetos distintos, que serão abordados em seguida:

- Dimensão da população: A população pode ser finita ou infinita, quando a probabilidade de ocorrer uma nova chegada, num certo intervalo de tempo, for ou não influenciada pelo número de clientes que se encontram nesse momento no sistema. Isto é, se o número de clientes no sistema, constituído pela fila e o serviço, for uma parte significativa da população, esta é considerada finita, como é o caso de um serviço num restaurante, em que o número de clientes que pretendem o serviço diminui substancialmente se o restaurante estiver cheio ou não. Por outro lado, a população de um serviço de urgência num hospital pode ser considerada infinita pois o número de clientes não diminui substancialmente com o aumento das entidades presentes no sistema.

- Dimensão da chegada: Os clientes podem chegar individualmente ou em grupo.
- Controlo da chegada: As chegadas dos clientes podem ser controláveis ou não controláveis, dependendo da natureza do serviço, por exemplo, se for o serviço de um consultório médico com marcações ou uma caixa de supermercado.
- Distribuição e taxa da chegada: O padrão das chegadas pode ser estudado através da distribuição das chegadas, que representa o número de entidades geradas por unidade de tempo (taxa de chegada), ou através do valor do intervalo de tempo entre chegadas. Este padrão pode ser constante ou aleatório, caso sejam fixos, ou não, os intervalos de tempo entre chegadas consecutivas. A taxa de chegada pode ser dependente ou independente do estado do sistema, caso varie ou não, consoante o que se passa no sistema. Em alguns sistemas com populações finitas, por vezes, à medida que o tempo passa o número de clientes vai diminuindo.

As distribuições mais utilizadas, na teoria de filas de espera, para descrever o comportamento das chegadas e também do serviço, são a distribuição de Poisson e a Exponencial Negativa. A caracterização das distribuições estatísticas das chegadas e do serviço é uma das fases mais importantes no estudo de modelos de fila de espera. Para tal, é necessário fazer uma descrição da informação recolhida, através de histogramas e parâmetros amostrais, como a média e a variância, inferir da amostra para os parâmetros da população e escolher uma distribuição teórica que se adeque ao histograma experimental.

- Atitude dos clientes: Por fim, pode-se fazer a distinção entre os clientes que esperam o tempo que for necessário pelo sistema, denominados pacientes ou, pelo contrário, os clientes impacientes, que desistem de esperar ao fim do tempo que consideram razoável.

Os principais parâmetros da fila de espera são o número de filas, o comprimento da fila e a sua disciplina, que serão descritos em seguida.

- Número: O sistema pode ser constituído por um servidor ou por mais do que um servidor, conforme será explicado mais adiante. No caso de existirem vários servidores, pode haver várias filas de espera, uma por servidor, denominada fila múltipla, ou uma única fila para os vários servidores, chamada fila simples.
- Comprimento: Uma fila pode ser considerada infinita, no caso da sua capacidade ser suficientemente alta em relação ao número de elementos que normalmente a podem constituir ou, pelo contrário, pode ser finita quando apenas pode receber poucos clientes.
- Disciplina: A disciplina de uma fila de espera relaciona-se com a ordem pela qual os clientes que se encontram na fila são selecionados para o serviço, através de regras de prioridade. Em geral, o critério mais utilizado é o denominado FIFO (*first in first out*), em que o primeiro cliente a chegar à fila de espera é o primeiro cliente a sair da fila para realizar o serviço que estava à espera, e assim sucessivamente.

Para caracterizar o atendimento ou serviço do sistema deve se ter em conta a configuração, a dimensão, a distribuição e taxa do serviço, conforme será explicado.

- Configuração: A forma como o atendimento está organizado pode variar em relação ao número de servidores em paralelo e em relação ao número das diferentes fases do serviço. Em vários sistemas, quando o atendimento é formado por várias tarefas distintas e cada uma requer uma fila de espera, denomina-se rede de filas de espera.

- Dimensão: Os clientes podem ser atendidos individualmente ou em grupo.

- Distribuição e taxa de serviço: A distribuição pode ser avaliada em termos da distribuição do tempo do serviço, que pode ser constante ou aleatório, ou em termos de taxa de serviço, dada pelo número de clientes atendidos por cada servidor por unidade de tempo. A taxa de serviço pode ser dependente ou independente do estado sistema.

Para utilizar modelos de filas de espera é necessário dispor de informação adequada, de dados sobre o custo de espera dos clientes e de um conjunto de indicadores úteis sobre a qualidade do serviço prestado aos clientes, tanto do ponto de vista destes como do ponto de vista do serviço. No Quadro 14 estão apresentados os indicadores mais utilizados para medir o desempenho de um sistema representado por filas de espera.

comprimento da fila;

número médio de clientes no sistema;

tempo médio de espera na fila;

tempo médio no sistema;

taxa média de ocupação do serviço;

taxa de chegada;

intervalo médio entre duas chegadas consecutivas;

taxa de chegada dependente do número de clientes no sistema;

taxa de serviço;

tempo médio de serviço;

taxa de serviço dependente do estado;

número de servidores;

taxa de ocupação;

Quadro 14 - Indicadores de modelos de filas de espera

III.2 Estrutura do modelo

Neste estudo foi desenvolvido um modelo em simulação, que reproduziu as operações de transporte público num corredor, cujo objetivo foi servir de apoio à avaliação do desempenho de diferentes modos de transporte público sujeitos a diferentes tipologias de procura.

O modelo construído, baseado em filas de espera, envolveu um conjunto de operações que representaram a espera dos passageiros nas paragens, a chegada dos veículos às paragens, a entrada dos passageiros no veículo, o seu transporte e a saída dos passageiros dos veículos para cada zona.

Através do programa *Anylogic* foi possível a obtenção de dados relativos aos processos referidos e, através do ajuste no modelo da procura total, da frequência dos veículos, da capacidade e da velocidade, foram obtidos um conjunto de indicadores que serão explicados mais adiante e que serviram de apoio à análise de desempenho.

Os estudos de comparação entre vários modos de transporte exigem um elevado nível de detalhe. Para simplificar as análises a realizar, este estudo foi realizado para um **corredor** que abrange uma determinada área. Ao nível do corredor, foi possível analisar de uma forma mais específica as medidas de desempenho dos vários modos de transporte.

Optou-se por um corredor com cinco paragens, que estabelecesse ligação entre 10 zonas distintas adjacentes, conforme está representado no esquema da Figura 2. A escolha de um corredor de pequena dimensão permitiu que fosse representada a realidade de forma simples, com maior controlo sobre o modelo de simulação.

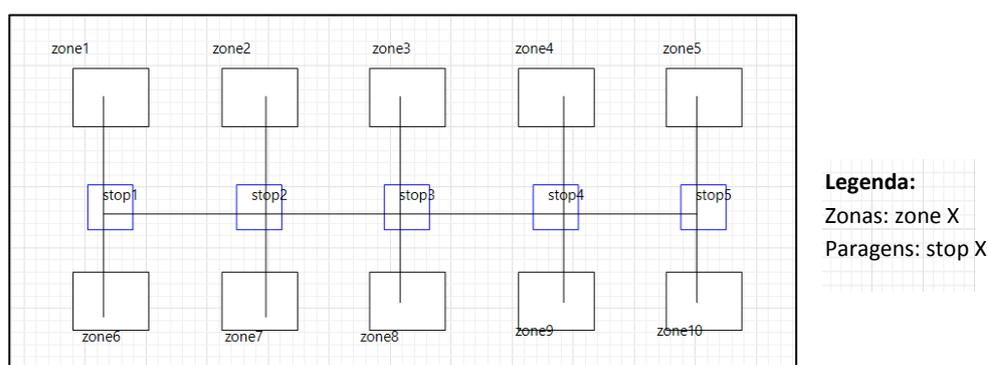


Figura 2 - Esquema ilustrativo do corredor de transportes públicos

Pretendeu-se modelar um sistema de transportes públicos sujeito a diferentes tipologias de procura. Para se compararem os resultados relacionados com as várias tipologias e com o objetivo de reduzir o quanto possível os efeitos não aleatórios dos parâmetros em estudo, procurou-se analisar viagens realizadas em situações comparáveis. Em geral, os resultados de estudos de transportes podem variar com a altura do dia, da semana, ou mesmo do ano em que se realiza a viagem (Bates et al., 2001). Neste estudo foi escolhido o período de hora de ponta da manhã de um dia de semana.

III.3 Descrição da construção do modelo

III.3.1 Construção do ambiente de simulação

Nesta secção é feita a descrição do ambiente de simulação do modelo desenvolvido, são apresentadas as suas principais componentes e as relações entre estas.

O modelo de simulação foi construído através de um conjunto de objetos ativos, que se relacionam entre si e por atividades de simulação, que serão descritas em seguida. Os objetos ativos são as principais entidades que definem o modelo, na medida em que representam os diversos objetos do mundo real, desde pessoas, a estações, veículos, recursos, entre outros.

Foram também definidos os agentes do modelo, representados por classes. Um agente é uma unidade do modelo que tem comportamento próprio, memória, tempos definidos, entre outros. Pode representar projetos, empresas, pessoas, animais, veículos, produtos etc. Uma classe é a base do programa *Anylogic* para definir um objeto e exige uma secção de programação própria. Neste projeto foram implementadas duas classes, a dos passageiros e a dos veículos, denominadas classes *Client* e classe *Vehicle*, respetivamente.

Os agentes da classe *Client* foram definidos por uma origem e um destino. Estes foram gerados nas *sources*, objetos que serão explicados em seguida, e saíram do sistema através do objeto *sink*.

A classe *Vehicle* foi programada para percorrer duas sequências de objetos, uma em cada sentido de tráfego, percorrendo todas as paragens. Os agentes desta classe, que representaram os veículos do sistema, foram gerados através de uma única *source* e permaneceram sempre no sistema.

Os restantes objetos, denominados objetos da rede, representam um conjunto de processos que formam a rede do modelo. A rede em estudo, denominada *Network Based Modeling* foi constituída pelos seguintes objetos:

1. Source:

Este elemento é geralmente o ponto de partida do processo e a sua função é gerar entidades. Neste modelo foram criadas 11 *sources*, 10 respetivas a cada zona onde foram introduzidos os passageiros no sistema e a outra geradora dos veículos.

As entidades podem ser geradas de diversas formas, ou através de uma taxa de chegada, que estabelece quantas entidades são geradas num intervalo de tempo constante, ou recorrendo a uma tabela onde são definidas as quantidades e os tempos exatos das suas chegadas ou, por último, pode ser utilizado um método de programação denominado *inject*. Neste estudo, para as *sources* relativas aos passageiros e para a *source* de veículos optou-se pela utilização do método *inject*, de modo a que os veículos e os passageiros fossem gerados externamente

seguindo as probabilidades de chegada de passageiros e rotação de veículos definidos pelos parâmetros do modelo.

2. Queue:

Neste modelo, que pretendeu simular um corredor de um sistema de transporte público, foi necessário representar a fila de espera dos passageiros nas paragens, a entrar e a sair do veículo, que podia ser imediata ou não, no caso de estarem vários passageiros a saírem no mesmo local, e a fila de espera dos veículos, quando se encontraram mais do que um veículo em simultâneo na mesma paragem. Para representar essa fila utilizou-se o objeto *queue*, que consiste numa fila de espera que permite que os objetos sigam o seu percurso no processo de simulação depois de estarem retidos um determinado intervalo de tempo. O processo de fila de espera representado foi baseado na prioridade da ordem de chegada, ou seja, no chamado FIFO, *first-in first-out*.

3. Pickup:

Para modelar a entrada dos passageiros nos veículos foi utilizado o objeto *pickup*. Este recolhe entidades, neste caso passageiros, de uma *queue*, e adiciona-os ao conteúdo de outra entidade, neste caso um veículo. Esta última entidade, denominada container, pode selecionar os passageiros, de acordo com o que se pretende. Por exemplo, é possível escolher a hipótese de entrarem todos os passageiros que se encontram na *queue*, os primeiros *N* passageiros ou aqueles que preencham determinados requisitos, definidos no modelo por condições. Estas hipóteses são consideradas enquanto as entidades estão na *queue*, uma vez que respeitam as condições, a *pickup* recolhe os passageiros e o modelo continua, sendo este processo instantâneo.

4. Delay:

Num sistema de transportes há vários momentos em que os passageiros ou os veículos têm de esperar, conforme foi referido quando se abordou o objeto *queue*. Para representar o tempo que uma determinada entidade demora a realizar uma atividade recorreu-se ao objeto *delay*, cuja função é atrasar uma entidade durante um determinado período de tempo. Este tempo é avaliado dinamicamente e tem natureza estocástica. Um *delay* pode ocorrer a várias entidades em simultâneo, como aconteceu no caso deste modelo, em que puderam estar vários passageiros à espera de um veículo ao mesmo tempo. Se a capacidade do *delay* é dinamicamente alterada e o número de entidades que se encontram neste objeto exceder a sua capacidade, este só permite a entrada de novas entidades quando as atuais terminarem os seus tempos, saírem do *delay* e o número de entidades ficar abaixo da capacidade.

5. NetworkMoveTo:

Para movimentar os agentes do modelo utilizou-se o objeto *NetworkMoveTo*, que estabelece para onde se dirige a entidade que recebe. Os atributos relacionados com a entidade em causa também se deslocam com elas, em que a velocidade neste objeto será a velocidade entidade,

independentemente da velocidade dos recursos anexados. O tempo gasto pela entidade neste objeto é igual ao comprimento do percurso mais curto entre a posição atual da entidade e o seu destino, dividido pela velocidade da entidade.

6. Dropoff:

Para representar a saída dos passageiros dos veículos, nas respectivas paragens utilizou-se o objeto *dropoff*. A sua função é remover as entidades do agente *container* e direcioná-las para outro objeto, através de *conectores*. No modelo em estudo, depois de todos os objetos *dropoff* foram colocadas filas de espera, para representar a ordem de saída dos passageiros dos veículos. A operação realizada pelo *dropoff* foi instantânea, sendo contabilizado o tempo da operação a representar no objeto *queue*. Da mesma forma que o objeto *pickup* seleciona as entidades que recebe, o objeto *dropoff* também escolhe as entidades a retirar do *container* de acordo com um limite ou condição, que são tidos em consideração enquanto a entidade ainda se encontra no *container*.

7. SelectOutput:

O objeto *selectOutput* recebe entidades e divide-as em dois conjuntos, através de dois pontos de saída. Esta divisão é baseada numa condição, que pode ser probabilística ou determinística e pode depender da entidade ou de fatores externos. A operação realizada por este objeto não requer tempo. Neste modelo foram utilizados *selectOutput* após cada *source* de forma a dividir os passageiros pelas paragens nos dois sentidos de tráfego, A e B. Além disso, usou-se este objeto depois das *dropoff* para representar a divisão dos passageiros que saíam numa determinada paragem nas duas zonas adjacentes.

8. Sink:

O objeto *sink* é em geral um ponto que marca o final de um processo no modelo. Este é utilizado para remover objetos do modelo, por isso, neste estudo foram criados 10 *sinks*, um por zona, para representar os passageiros cujo destino era uma dessas zonas, retirando-os do modelo representativo do sistema de transporte.

9. NetworkEnter:

Este objeto regista a entrada de uma entidade na rede e coloca-a num respetivo nó. Neste caso, regista a entrada de veículos na paragem 1 e 5. A entrada no sistema é imediata, este objeto não consome tempo.

Os nove objetos referidos apresentaram relações entre si e todos juntos definiram o modelo em estudo. Desta forma, foi importante entender melhor a relação entre eles e de que forma representaram um corredor de transportes públicos. Na Figura 3 encontram-se os diferentes objetos utilizados no modelo e na Figura 4 encontra-se a estrutura de uma parte do corredor, que será explicada em seguida.

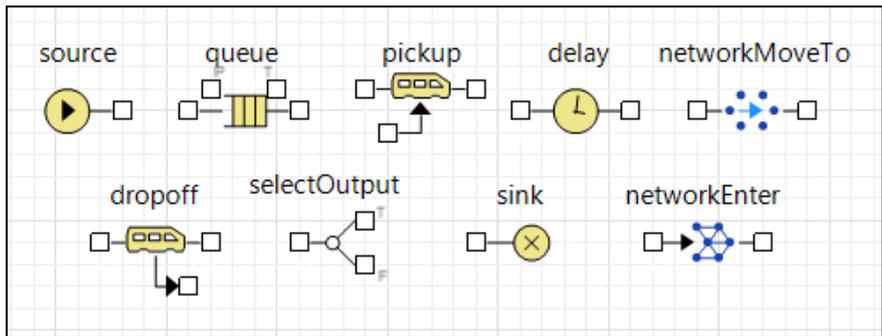


Figura 3 - Objetos da Simulação

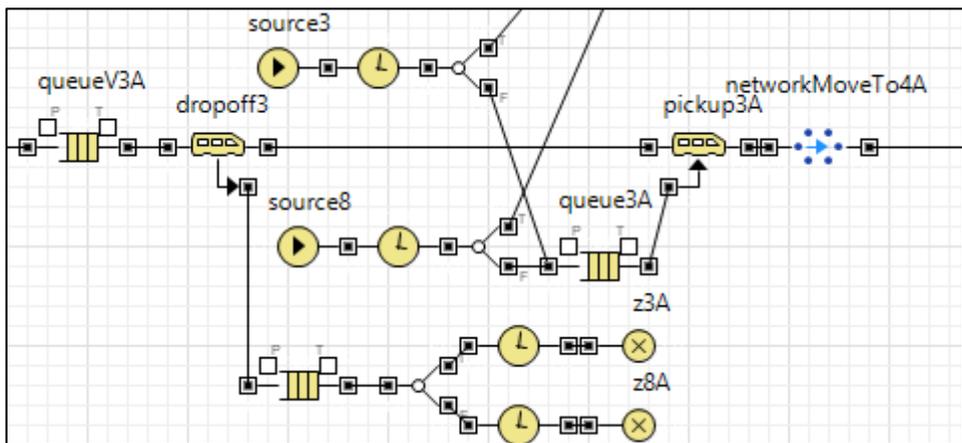


Figura 4 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 3)

Como já se referiu anteriormente, o modelo representou um corredor de transportes públicos com 5 paragens que conecta 10 zonas, em que cada paragem deu acesso a duas destas zonas. No exemplo da Figura 4 representa-se a saída dos passageiros que se dirigem para as zonas 3 ou 8, através da paragem 3 (*dropoff3*) e a recolha de outros passageiros nessa paragem (*pickup3A*), provenientes das zonas 3 e 8.

A *queueV3A* é uma fila de espera que foi necessária por poderem estar vários veículos ao mesmo tempo na paragem 3 e esta ter uma determinada capacidade. Desta forma, se a capacidade da paragem fosse apenas um veículo, o segundo veículo tinha de esperar que o primeiro saísse da paragem. Utilizou-se uma fila de espera depois do objeto *dropoff3*, para não saírem todos os passageiros em simultâneo. Estes passageiros tiveram dois destinos, como já foi referido, e recorreu-se ao objeto *selectOutput* para fazer a separação dos passageiros. Os passageiros saíram do sistema através de dois *sinks*, o *z3A* e o *z8A*, que representaram as zonas 3 e 8, respetivamente.

No modelo de simulação foi colocado um *delay* após cada *source* de passageiros e antes de cada *sink*, de forma a representar o tempo que os passageiros demoraram a percorrer o caminho entre a zona de origem e a paragem de entrada no sistema, assim como o tempo entre a paragem final e a zona de destino.

Os passageiros foram gerados nas *source3* e *source8* e recolhidos para o interior de um veículo através do objeto *pickup3A*. Como num sistema real os passageiros numa paragem não entram no veículo todos ao mesmo tempo, utilizou-se o objeto *queue3A* para modelar a ordem de entrada dos passageiros, provenientes das zonas 3 e 8. Para deslocar o veículo da paragem 3 para a paragem 4, utilizou-se o objeto *networkMoveTo4A*. Esta sequência de objetos foi repetida ao longo do corredor, e foram representados dois sentidos, o sentido A, que fez o percurso entre as paragens 1, 2, 3, 4 e 5, e o B que começou na paragem 5 e seguiu para as paragens 4, 3, 2 e 1.

Para alterar o sentido do percurso de A para B, ou vice-versa, foi necessário representar o tempo de espera dos veículos na estação terminal, através do objeto *delay*. Depois de um veículo deixar os passageiros que se dirigiam para as zonas 5 e 10 (*dropoff5*), o veículo esperou um tempo definido, no objeto *delay5*, antes de passar a efetuar o percurso no sentido B, que começa por recolher os passageiros na mesma paragem (*pickup5*), deslocando-se para a paragem 4 e assim em diante (ver Figura 5). Do mesmo modo, os veículos ao finalizarem o percurso B, na paragem 1, esperaram algum tempo e recomeçaram o percurso no sentido A (ver Figura 6).

Na Figura 6 pode-se observar o objeto *sourceVehicle*, seguido do *NetworkEnter*, que teve como função injetar veículos no corredor do modelo. Este corredor representa um sistema fechado de veículos, uma vez que entraram os veículos estabelecidos pelo utilizador e não saíram do sistema, ao contrário dos passageiros. O ambiente de simulação final apresentou a configuração que se ilustra no Anexo I.

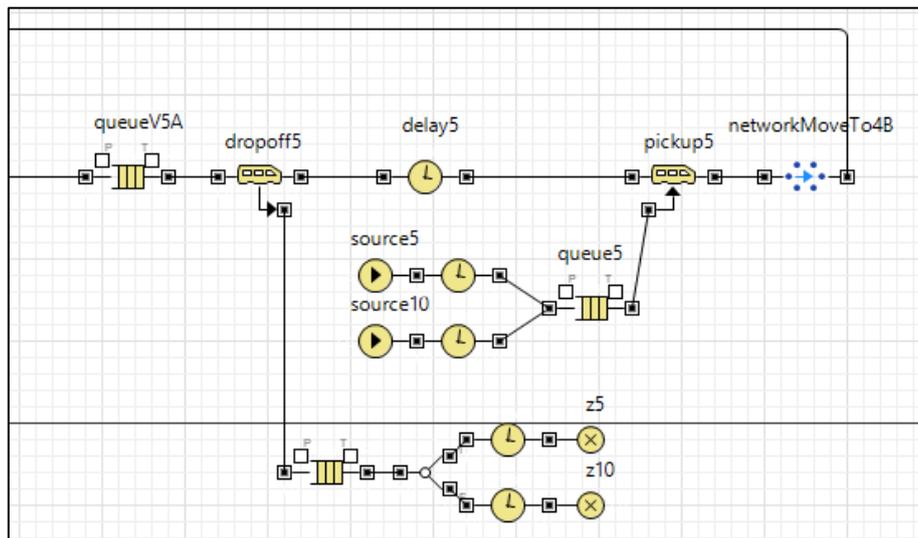


Figura 5 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 5)

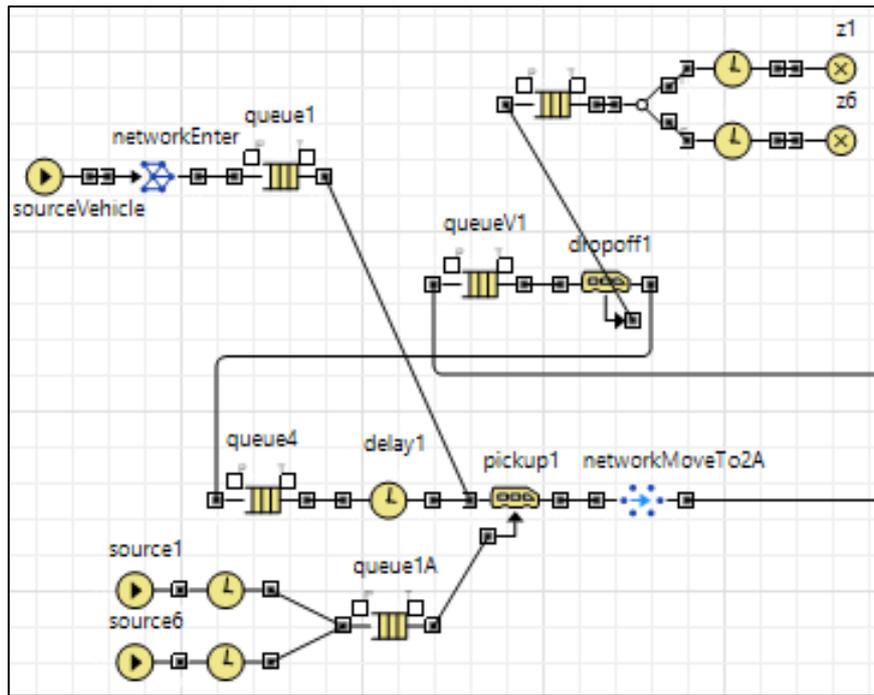


Figura 6 - Representação de uma parte do corredor de PT (Paragem 1)

III.3.2 Construção dos eventos e funções do modelo

O modelo de simulação foi construído com o apoio de eventos e de funções, definidas no programa *Anylogic*.

Um **evento** serve para programar uma determinada ação no modelo. Em geral é útil para realizar ações que se repetem ao longo do tempo, a uma taxa ou intervalo de tempo definidos. Pode também programar ações que se realizem a um determinado momento ou quando uma condição for verdadeira. Neste modelo foi criado um evento cíclico chamado **generation**, cujo objetivo final foi gerar os passageiros provenientes de uma origem e que se deslocavam para um destino específico. O evento foi definido com distribuição de *Poisson* e estabeleceu-se que a cada 0.1 minutos o sistema gerava um número aleatório, através de uma função uniforme, que avaliava se a probabilidade de existir uma viagem nesse instante era maior do que o número gerado.

A este evento foi associada uma **collection** denominada **ODs**, que representa um grupo de objetos de dados, neste caso associado a uma **matriz Origem-Destino** que definiu os trajetos realizados na rede criada. As matrizes OD têm um conjunto de pontos de paragem como coordenadas. As abcissas correspondem às origens e as ordenadas aos destinos dos utilizadores. A matriz OD, apresentada no Anexo II, foi inserida no programa através da opção **database**, que estabelece a comunicação entre o programa *Anylogic* e um ficheiro criado fora do programa, neste caso em *Microsoft Access*. Este ficheiro contém as percentagens de passageiros do sistema que se deslocam entre as 10 zonas definidas. Assim, foi possível alterar-se o valor total da procura, sem ter de se elaborar uma nova matriz para cada teste realizado.

Para estabelecer o percurso dos veículos, que contêm os passageiros utilizou-se uma **função**, à qual se deu o nome de **load**. Uma função retorna o valor de uma expressão cada vez que o utilizador a chama a partir do modelo. O percurso dos veículos foi dado por duas sequências, uma num sentido e outra no outro, que foram definidas através das **collections pathforward e pathbackward**.

Por fim, foi também criada outra função, denominada **board**, que garantiu que o número de clientes por veículo não superasse nunca a sua capacidade.

III.3.3 Parametrização do modelo

Os modos de transporte analisados neste estudo foram o Bus Rapid Transit (BRT), o Light Rail Transit (LRT), o Autocarro convencional (BUS) e o Metro (METRO), conforme foi referido anteriormente. Todos estes modos apresentam características de funcionamento e padrões de procura distintos. O Quadro 15 pretende resumir as características testadas para cada modo, encontradas na literatura, de forma a apresentar os dados necessários para os *inputs* do modelo.

MODOS DE TRANSPORTE				
PARÂMETROS	BRT	LRT	BUS	METRO
Frequência [veh/h]	6 a 20	6 a 20	2 a 10	6 a 30
Capacidade total do veículo [pass]	80 a 290	250 a 350	40 a 160	600 a 2 400
Capacidade da linha [pass/h]	6000 a 24 000	5000 a 24000	3000 a 6000	16000 a 70 000
Velocidade operacional [Km/h]	15 a 30	15 a 30	8 a 20	25 a 45

Quadro 15 - Dados para o modelo: características dos modos de transporte (Vuchic, 2005)

III.3.4 Configuração do modelo

Como foi referido anteriormente, o modelo baseado em simulação teve como objetivo servir de apoio à avaliação de desempenho de diferentes modos de transporte de um corredor de transporte público, sujeitos a diferentes tipologias de procura.

Nesta secção são descritos os procedimentos necessários para configurar o modelo e indicados os testes realizados, através da simulação.

Para configurar o modelo, em primeiro lugar foram declarados os *outputs* que se pretendiam obter, dentro da classe *vehicle* e da classe *client* e os seus valores foram recolhidos em diferentes objetos durante cada simulação e exportados para uma folha de texto fora do programa.

Relativamente aos passageiros, as variáveis selecionadas foram o tempo de entrada no sistema, a origem e o destino dos passageiros, o tempo de chegada à paragem de origem, o tempo de entrada no veículo, o tempo de chegada à paragem de destino e o tempo de chegada à zona de destino final. Estes valores foram recolhidos nos diferentes *sinks*.

As variáveis relativas aos veículos foram a identificação das paragens, o tempo em que o veículo chegou a cada paragem e o volume de passageiros em cada uma. Estes valores foram recolhidos em todas as *pickups* e *dropoffs*.

Depois disso, foram escolhidos os valores das variáveis, definidas na parametrização do modelo, para as várias simulações. O modelo foi então sujeito a várias configurações, onde se fizeram variar os parâmetros **capacidade do veículo**, **procura**, **velocidade operacional** e **frequência**, representando os vários modos de transporte em estudo. Os testes a realizar basearam-se nos valores médios, mínimos e máximos dos valores recolhidos na literatura, que se encontram no Quadro 15 da secção anterior.

Para cada simulação, foi usada uma opção do programa *Anylogic* denominada *Parameter Variation Experiment*, que permite realizar simulações para várias combinações em simultâneo, definindo os valores mínimos, máximos e o intervalo entre valores desejados (Figura 7).

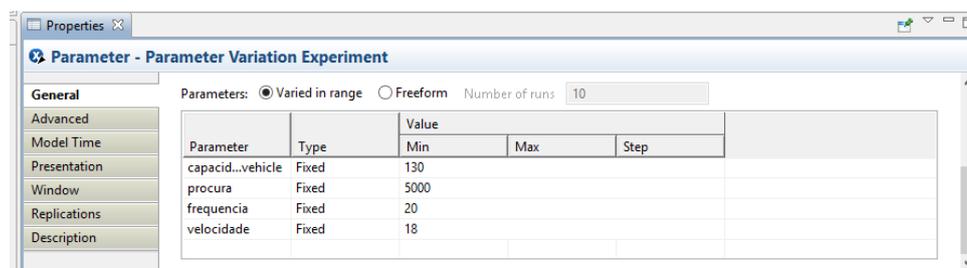


Figura 7 - Parameter Variation Experiment

Os testes foram realizados para os seguintes níveis de procura: 1000, 5000, 15000, 30000, 45000 e 60000 pass/h.

Para cada um destes níveis de procura foram realizados 36 testes, isto é, foram experimentadas 4 valores de capacidade distintas, relativas aos quatro modos de transporte e para cada um destes testaram-se 9 combinações diferentes, com 3 frequências e 3 de velocidades distintas, consoante o modo combinados entre si, conforme se mostra no Quadro 16. A velocidade operacional já tem em conta o grau de separação desse modo do restante tráfego, ou seja, a categoria do sistema, por isso, esta característica não foi considerada mais adiante como um indicador de desempenho.

PARÂMETROS	MODOS DE TRANSPORTE			
	BRT	LRT	BUS	METRO
Frequência [veh/h]	6, 13, 20	6, 13, 20	2, 6, 10	6, 18, 30
Capacidade total do veículo [pass]	185	300	100	1500
Velocidade operacional [Km/h]	15, 22, 29	15, 22, 29	8, 14, 20	25, 35, 45

Quadro 16 - Configurações dos *inputs* do modelo

III.4 Apresentação de resultados

O modelo de simulação foi testado para diversas configurações, onde se fizeram variar, para os diferentes modos em estudo, os parâmetros **capacidade do veículo, procura, velocidade operacional e frequência**, conforme foi explicado anteriormente. De forma a medir o desempenho do sistema foram escolhidos um conjunto de **indicadores** sobre a perspectiva da sustentabilidade, com base na pesquisa realizada na literatura, apresentada no capítulo II.2.

Indicadores de desempenho
1. Tempo médio de espera na estação [min]
2. Tempo médio a bordo [min]
3. Tempo médio total [min]
4. Confiabilidade [%]
5. Taxa de ocupação [%]
6. Taxa de ocupação máxima [%]
7. Emissões [goe/pass]
8. Custos ambientais [€/pass]
9. Custos de operação por passageiro [€/pass]
10. Custos de infraestrutura [€/pass.dia]
11. Custos ambientais e operação [€/pass]

Quadro 17 - Indicadores de avaliação de desempenho de sistemas de transportes públicos

Através da informação recolhida pelo modelo calcularam-se os tempos médios do sistema (de espera, a bordo e total), a distância total percorrida, o número de veículos e de passageiros, as taxas de ocupação média e máxima e o valor da confiabilidade do sistema.

Com base no valor dos fatores de emissões e dos custos recolhidos na literatura para os diferentes modos de transporte (Quadro 18), foram também calculadas as emissões de CO₂ de cada simulação, os custos ambientais, os custos de operação e de infraestrutura. As distâncias médias percorridas, o número de veículos e de passageiros não foram considerados indicadores de avaliação de desempenho, mas foram parâmetros necessários para a determinação de outras variáveis (como por exemplo os custos).

Dado que as emissões estimadas são referentes à formulação *tank-to-wheel*, os modos de propulsão elétrica (LRT e Metro) foram considerados com níveis de emissões nulos.

	BRT	LRT	BUS	METRO
Fator de emissões [g/km]	506,4	0	682,8	0
Custo ambiental [€/g de CO ₂]		1,812 E-05		
Custo de operação	1,06 €/veh-km	1,36 €/veh-km	0,75 €/veh-km	0,51 €/pass-km
Custos de infraestrutura (milhões€/km)	1,51	16,61	–	58,69
Custo do veículo (milhões€/veh)	0,47	2,63	0,23	6,61

Quadro 18 – Fator emissão e custos dos diferentes modos de transporte

Depois de calculados todos os valores referidos, para todas as configurações de cada modo de transporte, foram recolhidos os seus valores mínimos e máximos (ver Quadros 19 a 22).

BRT	1000		5000		15000		30000		45000		60000	
	Min	Max										
Indicador												
Tempo médio de espera na paragem [min]	1,6	5,2	1,8	25,9	23,8	39,4	34,8	43,8	37,9	45,1	38,9	45,9
Tempo médio a bordo [min]	5,4	11,2	5,6	12,5	5,9	11,8	5,8	12,1	5,8	12,0	5,7	11,9
Tempo médio total [min]	16,7	26,2	18,1	48,0	29,9	61,0	29,7	65,7	29,8	66,8	29,9	67,5
Número de veículos	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0
Número de passageiros	1567,0	1714,0	320,2	799,2	318,7	998,4	328,3	992,0	331,1	985,0	320,3	100,23
Confiabilidade	79,9	85,7	32,0	79,9	10,6	33,3	5,5	16,5	3,7	10,9	2,7	8,4
Taxa de ocupação	2,2	41,7	71,3	89,6	89,9	92,4	89,5	92,8	89,6	92,5	89,8	93,0
Taxa de ocupação máxima	2,4	70,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Emissões [goe/pass]	10,8	36,7	5,3	8,0	5,4	7,7	5,3	7,5	5,3	7,3	5,2	7,6
Custos ambientais [€/pass]	2,0E-04	6,6E-04	9,6E-05	1,5E-04	9,8E-05	1,4E-04	9,6E-05	1,4E-04	9,5E-05	1,3E-04	9,5E-05	1,4E-04
Custos operação [€/pass]	0,02	0,08	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Custos infraestrutura [€/pass]	0,51	0,82	0,13	0,26	0,12	0,26	0,13	0,25	0,12	0,25	0,12	0,26
Custos ambientais e operação [€/pass]	0,02	0,08	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02

Quadro 19 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, para o modo BRT

LRT	1000		5000		15000		30000		45000		60000	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Indicador												
Tempo médio de espera na paragem [min]	1,6	5,1	1,6	13,9	11,0	35,3	28,4	41,5	33,2	43,7	35,9	44,6
Tempo médio a bordo [min]	5,4	11,5	5,5	12,3	5,8	11,9	5,8	12,0	5,8	11,9	5,8	12,0
Tempo médio total [min]	16,7	26,4	16,8	35,9	29,3	56,8	44,6	63,2	48,7	65,2	51,4	66,4
Número de veículos	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0
Número de passageiros	1541,0	1704,0	5106,0	844,3	530,5	159,34	530,2	159,30	533,0	160,88	533,1	161,60
Confiabilidade	77,1	85,2	51,1	84,4	17,7	53,1	8,8	26,6	5,9	17,9	4,4	13,5
Taxa de ocupação	9,3	26,1	44,4	86,3	89,2	91,0	89,6	92,6	89,9	93,0	89,9	92,8
Taxa de ocupação máxima	17,3	42,3	72,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Emissões [goe/pass]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custos ambientais [€/pass]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custos operação [€/pass]	0,03	0,10	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Custos infraestrutura [€/pass]	4,61	6,24	0,98	1,43	0,60	1,37	0,62	1,37	0,61	1,37	0,61	1,36
Custos ambientais e operação [€/pass]	0,03	0,10	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Quadro 20 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, para o modo LRT

BUS	1000		5000		15000		30000		45000		60000	
Indicador	Min	Max										
Tempo médio de espera na paragem [min]	3,1	26,9	26,6	44,9	39,1	48,5	42,9	47,9	44,0	50,7	44,1	48,7
Tempo médio a bordo [min]	9,6	19,9	10,2	20,8	10,2	18,6	10,3	21,4	10,0	19,1	10,1	20,2
Tempo médio total [min]	22,5	56,6	46,8	75,4	59,2	76,8	63,7	79,0	63,7	79,6	64,1	78,6
Número de veículos	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0
Número de passageiros	595,0	161 3,0	572, 0	297 1,0	573, 0	291 7,0	564, 0	291 0,0	585, 0	299 8,0	588, 0	293 2,0
Confiabilidade	29,8	80,7	5,7	29,7	1,9	9,7	0,9	4,9	0,7	3,3	0,5	2,4
Taxa de ocupação	46,0	87,6	87,6	90,1	87,5	90,4	87,8	90,4	88,1	90,4	87,8	90,6
Taxa de ocupação máxima	80,0	100, 0										
Emissões [goe/pass]	10,7	25,8	10,2	14,0	10,6	13,6	10,0	14,2	10,3	14,1	9,9	14,0
Custos ambientais [€/pass]	1,9E- 04	4,7E -04	1,8E -04	2,5E -04	1,9E -04	2,5E -04	1,8E -04	2,6E -04	1,9E -04	2,6E -04	1,8E -04	2,5 E- 04
Custos operação [€/pass]	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Custos infraestrutura [€/pass]	0,11	0,28	0,08	0,29	0,09	0,29	0,09	0,29	0,08	0,28	0,09	0,28
Custos ambientais e operação [€/pass]	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02

Quadro 21 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, para o modo BUS

METRO	1000		5000		15000		30000		45000		60000	
Indicador	Min	Ma x	Min	Ma x	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Tempo médio de espera na paragem [min]	1,1	5,1	1,0	5,2	1,1	5,3	1,1	17,4	1,2	26,9	2,7	31,7
Tempo médio a bordo [min]	3,8	9,8	3,7	10, 1	3,7	10,0	3,7	11,1	3,8	10,8	3,8	10,7
Tempo médio total [min]	14, 6	24, 6	14, 5	24, 9	14,5	25,0	14,5	38,3	15,3	47,4	17,7	52,1
Número de veículos	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0	4,0	8,0
Número de passageiros	154 8,0	154 8,0	769 6,0	864 8,0	225 66,0	256 76,0	263 73,0	512 84,0	265 38,0	740 89,0	267 12,0	855 94,0
Confiabilidade	77, 4	77, 4	77, 0	86, 5	75,2	85,6	44,0	85,5	29,5	82,3	22,3	71,3
Taxa de ocupação	1,6	5,2	7,7	25, 3	23,6	73,0	46,5	87,9	69,2	89,7	82,0	91,5
Taxa de ocupação máxima	3,5	9,4	13, 9	39, 2	39,5	100, 0	79,0	100, 0	100, 0	100, 0	100, 0	100, 0
Emissões [goe/pass]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custos ambientais [€/pass]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Custos operação [€/pass]	0,7 7	1,6 3	0,7 9	1,3 9	0,89	1,49	0,94	1,73	0,98	1,89	1,05	2,04
Custos infraestrutura [€/pass]	15, 33	18, 45	2,7 5	3,3 8	0,93	1,14	0,51	0,90	0,38	0,89	0,33	0,89
Custos ambientais e operação [€/pass]	0,7 7	1,6 3	0,7 9	1,3 9	0,89	1,49	0,94	1,73	0,98	1,89	1,05	2,04

Quadro 22 – Valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, para o modo METRO

Os quadros apresentados mostram o comportamento dos indicadores de desempenho, com o aumento da procura, para os diferentes modos de transporte.

No caso da variável **tempo médio de espera na paragem**, os valores registados nos sistemas BRT e LRT para níveis de procura de 5000 e 15000 pass/h foram menores para o caso do sistema LRT. Entre 30000 e 60000 pass/h os valores apresentados para estes dois modos estiveram entre os 28 e os 49 minutos, pois a taxa de ocupação dos veículos foi máxima muitas vezes e conseqüentemente muitos passageiros não conseguiram entrar no veículo.

No sistema BUS, os passageiros tiveram de esperar no mínimo 26,6 minutos pelo seu transporte, no melhor dos cenários experimentados (procura de 5000 pass/h, frequência 10 veh/h, velocidade 20 km/h). Ao aumentar o nível de procura para 15000 pass/h, verificou-se que o valor mínimo de tempo de espera passou para 39,1 minutos, para a mesma frequência e velocidade, o que indica que este nível de procura pode já não ser compatível com um bom desempenho para este modo, com as características estudadas. Porém, também existiram valores elevados de tempos de espera para o nível de procura de 5000 pass/h (cerca de 45 minutos), pois foram experimentadas configurações com frequências muito baixas, de 2veh/h.

Por fim, no caso do METRO, os tempos de espera foram bastante inferiores aos dos outros modos de transporte. Contudo, registaram-se valores elevados para as procuras de 45000 e 60000pass/h, para a frequência 6 veh/h (27 e 32 minutos). Nestes casos foi também verificada uma taxa de ocupação elevada.

Os resultados obtidos através do modelo de simulação desenvolvido mostraram que o tempo de espera na paragem variou com a frequência do sistema, com a taxa de ocupação e variou pouco com a velocidade dos veículos.

O **tempo a bordo** não dependeu da procura, isto é, não existiu variação na duração da viagem dentro do veículo, para 5000 ou 60000 pass/h no sistema. Além disso, esta variável também não foi afectada pela taxa de ocupação, sendo apenas dependente da velocidade.

Notou-se que, através do modelo, os valores do indicador tempo a bordo mostraram uma variação com o aumento da frequência. Na realidade, isto não se verifica, porque o tempo a bordo é independente da frequência do sistema, num corredor onde não se verifica a presença de tráfego, ou seja, de engarrafamentos de veículos. Isto aconteceu porque os valores apenas foram declarados como *output* do sistema uma vez que os passageiros chegaram aos seus destinos. Para frequências baixas, em duas horas de experimentação, alguns dos passageiros não tiveram tempo de chegar ao destino e por isso não foram declarados. Este fenómeno foi uma limitação do modelo, dado que este não contabilizou todos os clientes que utilizaram o sistema.

O indicador **tempo médio total de viagem** foi calculado através do somatório do tempo de espera médio na paragem, do tempo médio a bordo e do tempo médio despendido entre a

zona de origem e a paragem e a paragem e a zona de destino. O tempo entre as zonas de origem/destino e as paragens foi considerado o mesmo para todo o corredor, entre todas as zonas e paragens, pois a distância entre estas foi a mesma (324 metros). Considerou-se que a velocidade média de um peão é 4 km/h e por isso o tempo médio calculado foi 4,86 minutos.

O indicador de desempenho **confiabilidade** foi estimado através do rácio entre os passageiros transportados e a procura e pretendeu avaliar a confiança que é possível ter no sistema. O número de passageiros transportados foi gerado aquando a saída dos passageiros do sistema, por isso, ao fim das duas horas de simulação os passageiros que ainda se encontravam nos veículos não foram contabilizados pelo modelo. Desta forma, a confiabilidade indicou a percentagem de serviços completos oferecidos aos passageiros nas duas horas.

Através da análise dos valores obtidos pelo modelo, apresentados nos Quadros 19 a 22, concluiu-se que à medida que a procura aumentou a confiabilidade foi menor, pois cada vez mais passageiros não chegaram aos seus destinos finais.

O sistema METRO apresentou os melhores valores de confiabilidade do sistema. Pelo contrário, o sistema BUS apresentou o nível de confiabilidade mais baixo, devido aos parâmetros de *input* capacidade, frequência e velocidade também serem os mais baixos. Para o nível de procura de 60000 pass/h (confiabilidade de 0,5%), apenas foram transportadas 2932 passageiros, o que levou a confirmar que este sistema, com as características experimentadas, não foi o mais indicado para níveis de procura elevados.

A variável **taxa de ocupação média** revelou comportamentos bastante diferentes de modo para modo, em função dos parâmetros procura, frequência e velocidade. Nos sistemas BRT e LRT, a taxa de ocupação média apresentou muito pouca variabilidade para níveis de procura superiores a 5000 pass/h (cerca de 90%). No caso do nível de procura 5000 pass/h observaram-se valores mais baixos para o BRT (cerca de 70%) apenas no caso da frequência máxima de 20veh/h e cerca de 60% e 45% para o LRT, para frequências de 13 e 20 veh/h, respetivamente.

A taxa de ocupação média do sistema BUS não variou praticamente com o nível de procura e variou pouco com os diferentes valores de frequência testados. O METRO foi o sistema que revelou maior sensibilidade em relação à variação desta variável em função dos diferentes níveis de procura, sendo que só atingiu taxas de ocupação médias tão elevadas como a dos outros modos para os níveis de procura de 45000 (com a frequência 6 veh/h) e 60000 pass/h (com as frequências 6 e 18 veh/h).

A **taxa de ocupação máxima** tinha como objetivo avaliar o nível de conforto do sistema. Nos modos BRT, LRT e BUS, para todos os níveis de procura observaram-se taxas máximas de 100%, à exceção das taxas de ocupação máximas do sistema LRT para combinações de frequência de 20 veh/h com velocidades de 15 e 20 km/h. O METRO apresentou também taxas de ocupação de 100%, para todas as combinações de frequência e velocidade dos níveis de

procura de 45000 e 60000 pass/h e para a maioria das combinações do nível de procura de 30000 pass/h.

Este indicador de desempenho teve uma limitação, pois não permitiu perceber que parte da viagem apresentou pouco conforto para os passageiros. Isto é, o modelo em estudo apenas revelou se o veículo teve alguma vez durante todo o seu percurso com taxa de ocupação máxima, não diferenciando os casos em que o sistema apresentou um baixo nível de conforto apenas durante uns minutos da viagem ou durante toda a viagem, o que influencia bastante a percepção de conforto por parte dos passageiros.

O nível de **emissões** de CO₂ e os respetivos **custos ambientais** por passageiro foram considerados nulos nos casos dos modos LRT e Metro, por serem sistemas com propulsão elétrica. O nível de emissões CO₂ depende da distância percorrida pelo veículo. No caso do sistema BRT o valor das emissões e dos custos ambientais foi cerca de metade das emissões do sistema de autocarro regular, mesmo percorrendo mais quilómetros o sistema BRT do que o sistema BUS.

Os **custos de operação** por passageiro dos sistemas BRT e BUS foram praticamente os mesmos e os custos de operação do sistema LRT foram ligeiramente inferiores a estes, dada a maior capacidade do LRT que conduz a que em taxas de ocupação muito elevadas compensem os maiores valores unitários em relação ao BRT. Nos três sistemas estes valores foram calculados em função da distância-veículo percorrida e esta não dependeu da procura do sistema, por isso os custos de operação não dependeram do nível de procura.

No sistema METRO os custos de operação basearam-se num valor recolhido na literatura, em que as unidades foram passageiros-quilómetro e, por essa razão, os valores calculados variaram com o nível de procura. Desta forma, os custos médios de operação por passageiro do sistema metro foram bastante superiores aos dos outros modos. Não se foi possível obter os valores dos custos de operação na unidade veículo.km, o que pode constituir uma limitação da análise, por enviesar os valores do METRO em relação aos outros modos.

Os custos totais por passageiro (somatório dos custos de operação e custos ambientais) foram deste modo muito semelhantes entre os modos BRT, LRT e BUS e foram muito inferiores aos custos totais do sistema METRO.

Por fim, os **custos de infraestrutura** dependeram da extensão da infraestrutura, que neste caso se tratou de um corredor com 1764 metros. Por essa razão, o valor do custo de infraestrutura total foi constante por modo de transporte. Como neste estudo foram estimados os custos por passageiro por dia, os custos de infraestrutura também apresentaram maiores variações para o modo de transporte METRO, que apresentou uma variabilidade maior no número de passageiros transportados. O sistema com maiores custos de infraestrutura por passageiro por dia foi o METRO, seguindo-se o LRT, o BRT e por fim o sistema BUS, onde apenas foram contabilizados os custos dos veículos necessários.

III.5 Avaliação de desempenho. Análise multi-critério

Neste capítulo pretendeu-se avaliar o desempenho do corredor representado pelo modelo de simulação, sujeito a diferentes tipologias de procura. Para tal, foi feita uma análise multi-critério baseada nos resultados obtidos, apresentados anteriormente.

Conforme já foi estudado no capítulo II.4.3, a análise multi-critério é um método de avaliação que compara diferentes critérios, ou parâmetros heterogêneos, combinando diferentes requisitos a ter em consideração no processo de tomada de decisão. Na análise multi-critério realizada neste trabalho utilizaram-se os indicadores de desempenho apresentados na secção anterior, exceto os indicadores **tempo total de viagem, taxa de ocupação máxima, nível de emissões e custo total (ambiental e operação)**. O tempo e custo total de viagem e o nível de emissões foram retirados por serem variáveis que tornariam a análise enviesada, pois contabilizaram valores de outras variáveis como o tempo a bordo, por exemplo, ou os custos ambientais, que já tinha em conta o nível de emissões. A taxa de ocupação máxima não foi considerada por ser um indicador pouco preciso na avaliação através deste modelo, como foi explicado na secção anterior.

De forma a possibilitar a comparação entre os restantes indicadores, começou por se fazer uma padronização hipergeométrica destas variáveis, isto é, traduziram-se os valores absolutos dos indicadores de desempenho em percentagens relativas entre o maior e menor valor existentes para todas as combinações. Em seguida calculou-se o desempenho global de cada combinação, através de uma ponderação média, dando o mesmo peso a cada indicador. Depois, para o nível de procura de 5000 pass/h, escolheu-se a combinação com melhor desempenho global para cada modo e repetiu-se este processo para todos os níveis de procura (Quadro 23).

Modo/Capacidade [pass]		BRT/185									LRT/300								
Frequência [veh/h]		6	6	6	13	13	13	20	20	20	6	6	6	13	13	13	20	20	20
Velocidade [Km/h]		15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29
Desempenho médio [%]	Procura 1000 pass/h	77	78	78	72	73	74	63	67	71	66	67	68	67	68	69	66	68	71
	Procura 5000 pass/h	70	71	72	81	82	83	82	85	86	77	77	78	86	87	88	81	84	88
	Procura 15000 pass/h	63	64	64	68	70	71	73	73	73	66	67	68	76	78	79	83	85	85
	Procura 30000 pass/h	61	62	62	65	66	67	67	68	69	63	64	64	70	72	73	74	76	77
	Procura 45000 pass/h	60	61	62	64	65	66	65	66	67	62	62	63	68	70	70	71	73	75
	Procura 60000 pass/h	60	61	61	62	64	65	64	65	66	61	62	63	67	69	69	70	72	73
Modo/Capacidade [pass]		BUS/100									METRO/1500								
Frequência [veh/h]		2	2	2	6	6	6	10	10	10	6	6	6	18	18	18	30	30	30
Velocidade [Km/h]		8	14	20	8	14	20	8	14	20	25	35	45	25	35	45	25	35	45
Desempenho médio [%]	Procura 1000 pass/h	64	68	68	76	81	83	71	75	76	59	59	60	60	60	60	59	58	59
	Procura 5000 pass/h	48	51	54	54	58	59	59	63	63	62	63	63	63	64	66	61	63	63
	Procura 15000 pass/h	48	48	50	50	54	55	52	56	57	77	78	79	75	76	77	73	74	74
	Procura 30000 pass/h	45	50	51	49	53	52	50	54	55	71	71	72	82	83	80	78	80	80
	Procura 45000 pass/h	46	49	51	49	52	54	50	53	54	66	67	67	82	81	76	82	81	82
	Procura 60000 pass/h	45	50	50	49	52	53	50	53	54	63	64	64	77	77	73	81	78	78

Quadro 23 - Desempenho médio dos diferentes modos de transporte, com a padronização hipergeométrica

Pela análise do quadro anterior, observou-se que:

- para 1000 pass/h o modo de transporte com um melhor desempenho global foi o BUS
- para níveis de procura 5000 pass/h os sistemas BRT e LRT foram os modos que apresentaram melhor desempenho global;
- para níveis de procura de 15000 pass/h, o LRT apresentou o melhor desempenho, exceto para a frequência de 6veh/h, em que o METRO foi o modo com melhor desempenho global;
- para níveis de procura de 30000, 45000 e 60000 pass/h o sistema METRO foi o sistema com melhor desempenho global;
- o sistema BUS representado no modelo de simulação revelou o pior desempenho global para todos os níveis de procura, sendo que para 5000 pass/h o METRO teve um desempenho global máximo semelhante ao máximo do sistema BUS.

Mais à frente apresenta-se uma análise mais detalhada do desempenho global dos diferentes sistemas.

Ao serem analisados os valores máximos e mínimos dos indicadores de desempenho, utilizados na padronização hipergeométrica, concluiu-se que seria necessário definir novos valores máximos e mínimos, utilizando valores aconselháveis na literatura para a consideração de valores bons e maus de desempenho. Na ausência de referência foram usados os valores disponíveis da padronização hipergeométrica

Foram então atribuídos novos intervalos para cada variável, que estão apresentados no Quadro 24 e foi realizada uma nova padronização em função destes limites. Os valores dos limites máximos utilizados para os indicadores de custos foram os mesmos da padronização anterior.

Indicadores de desempenho	Limite mínimo	Limite máximo
1. Tempo médio de espera na estação [min]	0	30
2. Tempo médio a bordo [min]	5	15
3. Confiabilidade [%]	50	100
4. Taxa de ocupação média [%]	7,7	100
5. Custos ambientais [€/pass]	0	2,6E-04
6. Custos de operação [€/pass]	0,010	2,036
7. Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,009	3,378

Quadro 24 - Limites pré-definidos para a segunda padronização

No Quadro 25 encontram-se os valores do desempenho médio dos indicadores depois da segunda padronização. Foi atribuído, mais uma vez, o mesmo peso a cada indicador.

Modo/Capacidade [pass]		BRT/185									LRT/300								
Frequência [veh/h]		6	6	6	13	13	13	20	20	20	6	6	6	13	13	13	20	20	20
Velocidade [Km/h]		15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29	15	22	29
Desempenho médio [%]	Procura 1000 pass/h	67	69	70	64	66	68	56	61	66	56	58	60	60	62	63	59	63	66
	Procura 5000 pass/h	55	58	59	70	72	74	75	78	80	62	63	64	79	81	82	74	79	84
	Procura 15000 pass/h	55	56	57	58	59	60	60	62	64	55	57	57	64	67	68	71	73	75
	Procura 30000 pass/h	54	56	56	58	59	60	57	60	62	55	57	58	61	63	64	62	65	68
	Procura 45000 pass/h	55	56	57	58	60	60	57	60	62	55	57	57	61	63	64	61	65	68
	Procura 60000 pass/h	55	56	56	58	59	60	57	60	62	55	57	57	61	63	64	61	65	68
Modo/Capacidade [pass]		BUS/100									METRO/1500								
Frequência [veh/h]		2	2	2	6	6	6	10	10	10	6	6	6	18	18	18	30	30	30
Velocidade [Km/h]		8	14	20	8	14	20	8	14	20	25	35	45	25	35	45	25	35	45
Desempenho médio [%]	Procura 1000 pass/h	52	54	54	65	72	74	59	67	68	54	55	55	60	61	61	61	61	61
	Procura 5000 pass/h	45	44	45	43	47	49	44	50	51	54	55	55	59	60	61	58	59	59
	Procura 15000 pass/h	45	43	43	43	48	49	44	48	49	69	70	71	71	72	72	69	70	70
	Procura 30000 pass/h	43	45	45	44	47	47	43	48	50	57	58	59	78	78	74	74	75	75
	Procura 45000 pass/h	44	43	45	44	47	49	44	47	49	53	54	55	74	74	67	78	75	76
	Procura 60000 pass/h	43	45	43	44	47	48	43	48	49	52	53	53	66	67	64	75	70	70

Quadro 25 - Desempenho médio dos diferentes modos de transporte, com a padronização por intervalos pré-definidos

Para a nova padronização, foi realizada uma análise mais detalhada e observou-se que:

- o sistema **BUS** foi o modo com melhor desempenho global para o nível de procura de 1000 pass/h;
- para o nível de procura 5000 pass/h o sistema LRT foi o modo com melhor desempenho global, seguindo-se o BRT. O sistema BUS revelou o pior nível de desempenho global;
- no caso das simulações para a procura de 15000 pass/h, o sistemas LRT e BRT pioraram o seu desempenho global, em relação ao nível de procura de 5000pass/h e o sistema METRO melhorou, sendo que foram os modos LRT e, em segundo lugar, o METRO que apresentaram os maiores níveis de desempenho global. Para a mesma frequência (6 veh/h) o METRO revelou melhor desempenho do que o LRT. Para frequências semelhantes (20 e 18 veh/h), o desempenho do sistema LRT foi muito semelhante ao METRO. O modo BUS foi mais uma vez o sistema com pior desempenho.

- para os níveis de procura de 30000 e 45000 pass/h o METRO foi o sistema com melhor desempenho global e o sistema BUS com o pior. Contudo, para níveis de frequência de 6veh/h, os modos BRT, LRT e METRO apresentaram valores muito próximos de desempenho global para estes níveis de procura.
- o sistema METRO foi o modo com melhor desempenho global para o nível de procura de 60000 pass/h mas, tal como aconteceu com os níveis de procura anteriores, o seu valor máximo verificou-se para a velocidade mais baixa (25 km/h).

Depois da análise dos resultados das duas padronizações foi possível concluir que os sistemas BRT, LRT E BUS não mostraram ser os modos mais indicados para as procuras 30000, 45000 e 60000 pass/h. Os valores de desempenho global destes três modos diminuíram nestes níveis de procura e mantiveram-se constantes. O METRO apresentou-se como a melhor solução para sistemas com estes níveis de procura.

Por outro lado, para o nível de procura de 5000 pass/h os modos LRT e BRT foram as melhores opções. O sistema BRT revelou ser sempre uma melhor opção do que o sistema BUS, de acordo com a análise realizada. O sistema BUS revelou ser a melhor solução para o nível de procura de 1000 pass/h.

Para uma análise do desempenho dos diferentes modos de transportes mais rigorosa, foram escolhidas as melhores combinações de cada modo, de acordo com a padronização pelos intervalos pré-definido e, a partir destas, foi feita a análise de todos os indicadores de desempenho, com o apoio dos gráficos que se seguem (Figs. 8 a 13), baseados nos valores do Anexolll.

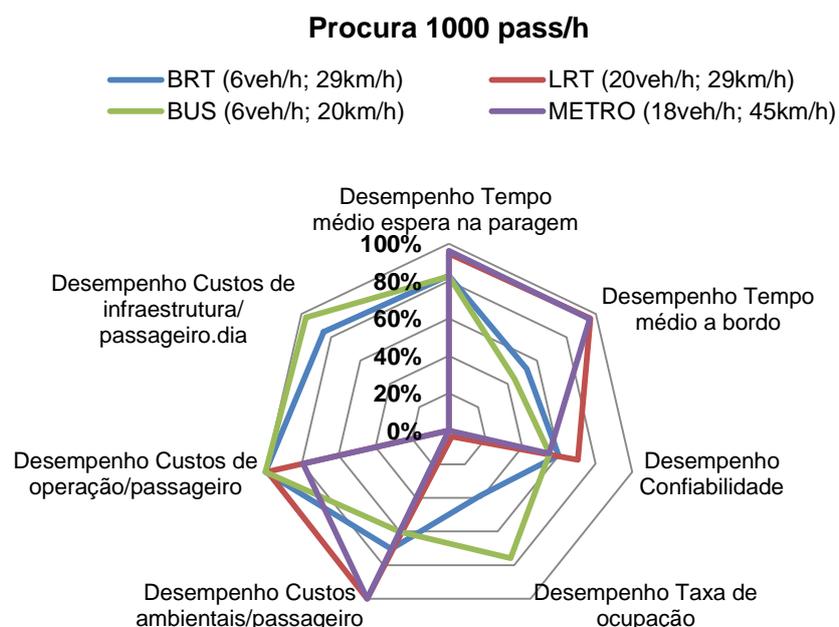


Figura 8- Desempenho dos modos de transporte para a procura de 1000 pass/h

Para o nível de procura mais baixo, 1000 pass/h, o modo com melhor desempenho global foi o sistema BUS, seguindo-se o sistema BRT. Com este nível de procura, o tempo médio a bordo dos modos BUS e BRT foi superior ao dos modos LRT e Metro (10min e 5 min). No BUS o tempo médio de espera na paragem foi cerca de 5min e note-se que este valor foi significativamente inferior ao valor deste indicador no nível de procura de 5000pass/h (27min). O LRT apresentou maior confiabilidade, seguindo-se o BRT. O BUS foi o pior sistema em termos de custos ambientais, mas o melhor em termos de custo de operação por passageiro, juntamente com o BRT.

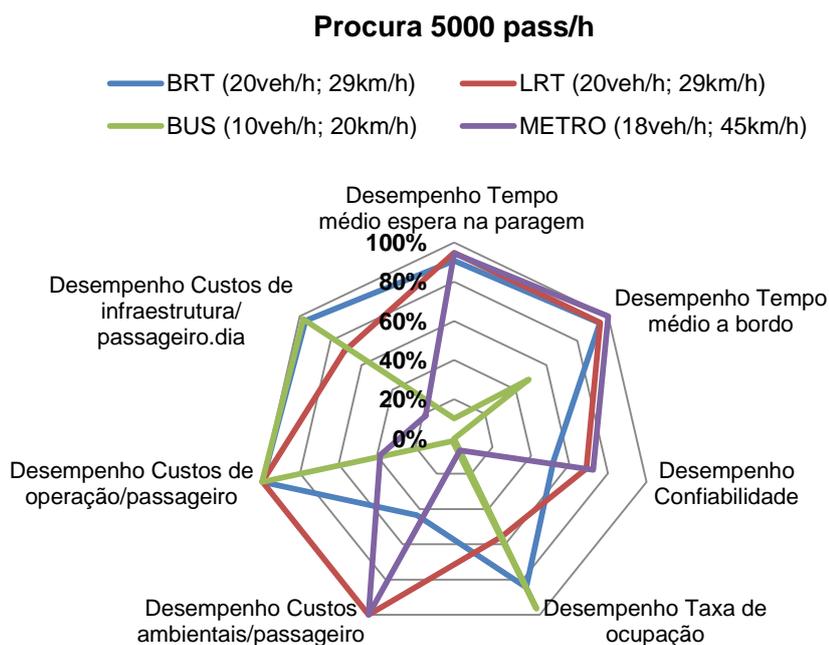


Figura 9 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 5000 pass/h

Através do gráfico da Figura 9, observou-se que, apesar do sistema LRT ter tido o maior valor de desempenho global, os outros modos revelaram desempenhos superiores em alguns dos indicadores, ou seja, é importante realçar que apenas foi possível concluir que este modo seria o melhor para a procura 5000 pass/h, se for dada a mesma importância aos diferentes critérios (indicadores). Por exemplo, se apenas forem tidos em conta o desempenho dos tempos de espera e a bordo, o melhor sistema foi o METRO por proporcionar muito maior velocidade e frequência. Da mesma forma, o sistema METRO foi o sistema com maior desempenho de confiabilidade (72%), por ser o que permitiu o transporte de maior número de passageiros no intervalo de tempo estudado (8619 passageiros). Contudo, este sistema apresentou um nível muito mais baixo de desempenho do ponto de vista de custos de operação e infraestrutura e de taxas de ocupação do veículo (apenas 7%).

Em termos de custos ambientais, os modo BUS apresentou muito pior desempenho (2%) do que o BRT (44%). Os custos de operação foram praticamente os mesmos no caso do BRT, LRT e BUS.

Os modos BRT e BUS destacaram-se do ponto de vista de económico, ou seja, tendo em conta os custos para o operador e a rentabilidade do sistema, em termos de taxa de ocupação. Por outro lado, o modo LRT destacou-se do ponto de vista de confiabilidade do sistema, ou seja, neste intervalo de tempo de duas horas (ou seja, 10000 passageiros) a procura foi mais satisfeita com o LRT (cerca de 8500 passageiros) do que o BRT (cerca de 7500 passageiros).

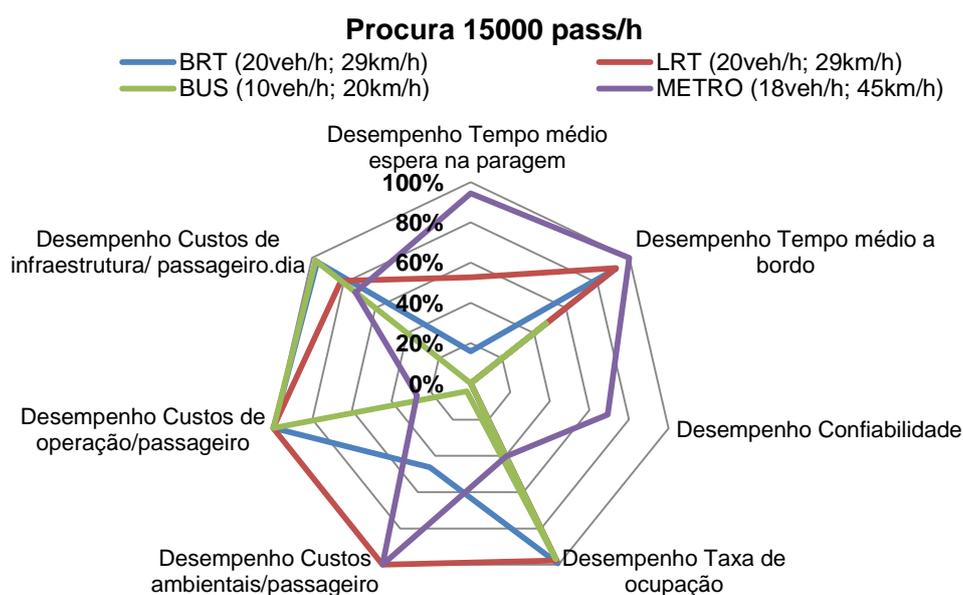


Figura 10 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 15000 pass/h

A análise multi-critério também foi útil para o nível de procura de 15000pass/h (Fig. 10) pois verificaram-se desempenhos globais (rever Quadro 25) bastante próximos entre os modos LRT e METRO. O modo LRT apresentou o maior nível de desempenho global do sistema, pois revelou alto desempenho em termos de tempo a bordo, de taxa de ocupação e de custos de operação e ambientais (custos nulos). Contudo este sistema apresentou um nível desempenho da variável confiabilidade no sistema nulo. De facto, o modo LRT experimentado no modelo de simulação apenas teve capacidade de satisfazer cerca de 13000 passageiros ao fim das duas horas de simulação, e a procura foi de 30000 passageiros nesse período de tempo (note-se que o limite mínimo desta variável considerado na segunda padronização foi 50%).

Os modos BRT e BUS também apresentaram um desempenho nulo a nível da confiabilidade no sistema, sendo que o METRO foi o único modo capaz de responder a este nível de procura. Apesar disso, o METRO apresentou um baixo desempenho a nível de taxa de ocupação e de custos de operação por passageiro. O desempenho do custo de infraestrutura por passageiro por dia (73%) também foi o pior de todos os modos (BRT e BUS com os melhor desempenhos e LRT cerca de 82%).

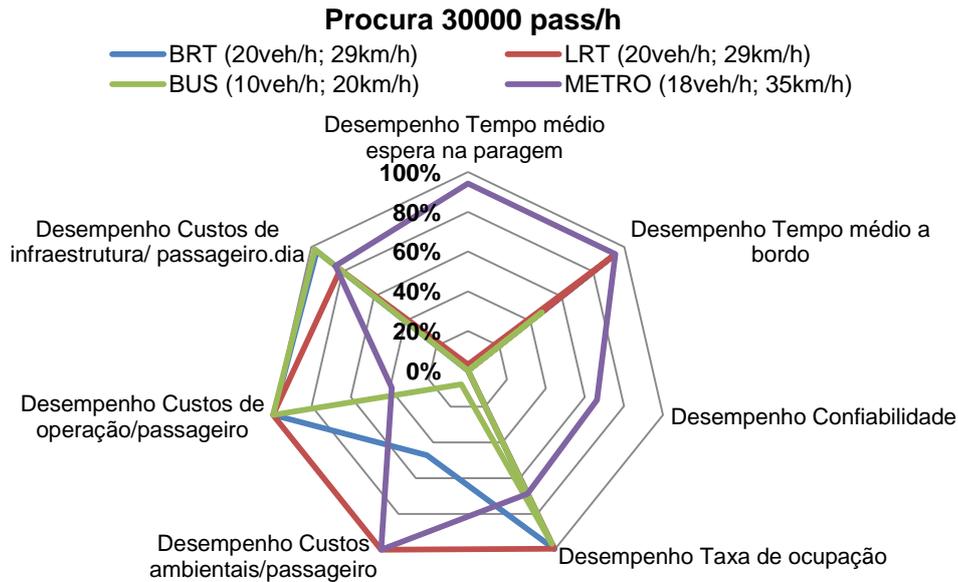


Figura 11 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 30000 pass/h

Pela análise do gráfico da Figura 11 concluiu-se que os modos BRT, LRT e BUS apresentaram desempenhos semelhantes para a maioria das variáveis e estes divergiram, na maioria dos casos, do comportamento do modo METRO. Contudo, o tempo médio a bordo dos sistemas LRT e BRT foi idêntico ao do METRO (cerca de 6 minutos) e os modos BRT, LRT e BUS apresentaram melhor desempenho de taxas de ocupação. Notou-se no entanto que o METRO revelou uma taxa de ocupação de 66%, superior à taxa de ocupação para o nível de procura analisado anteriormente (42%).

Os modos BRT, LRT e BUS revelaram de novo um nível de confiabilidade nulo, não satisfazendo a procura de 30000 pass/h. O BRT e o BUS apresentaram tempos médios de espera demasiado elevados (superiores aos 30 minutos definidos nos intervalos da padronização) e o sistema LRT revelou tempo médio de espera muito baixo pois foi próximo do limite (29,1 min), distinguindo-se bastante do metro (1,7 min).

Por fim, o desempenho dos custos de operação e de infraestrutura por passageiro melhorou para o METRO em relação ao nível de procura anterior, por conseguir servir mais passageiros.

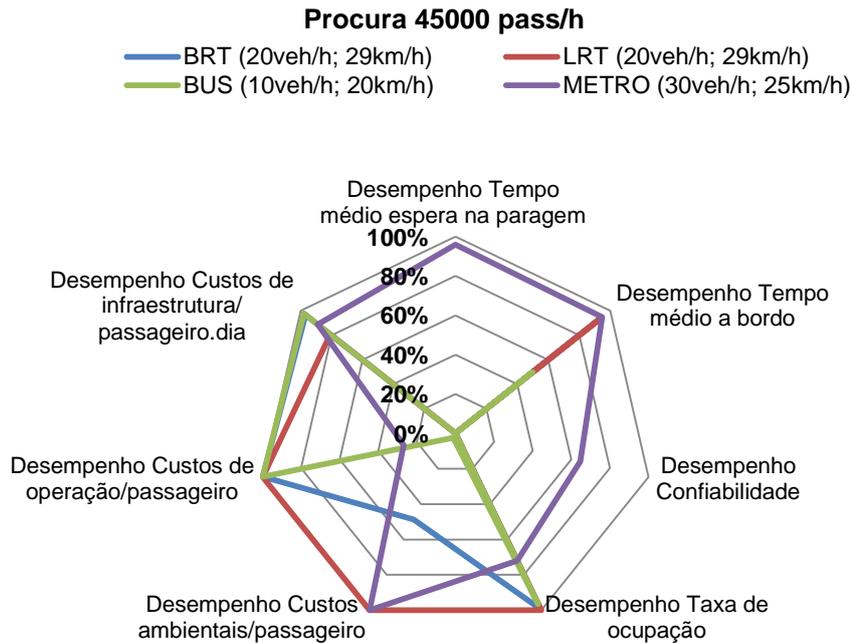


Figura 12 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 45000 pass/h

O gráfico apresentado na Figura 12 é bastante semelhante ao gráfico da Figura 11, ou seja, o comportamento das variáveis dos quatro modos de transporte neste caso foi parecido ao do estudado para a procura de 30000 pass/h. Para o nível de procura de 45000 pass/h, o modo com melhor desempenho foi o METRO. O desempenho global do METRO para estes dois níveis de procura foi o mesmo (78%), como se mostrou anteriormente no Quadro 25. Com este aumento da procura observou-se apenas uma ligeira melhoria de desempenho do sistema, do ponto de vista da taxa de ocupação (de 66 para 69%) e de custo de infraestrutura por passageiro, por ser um custo fixo repartido por um maior número de passageiro, baixando de 0,5 para 0,4 €/passageiro.dia. Registou-se, por outro lado, uma pequena diminuição do nível de desempenho do METRO em termos de custos de operação por passageiro, que para o nível de procura anterior foram cerca de 1,25 €/passageiro e para este nível cerca de 1,5 €/passageiro.

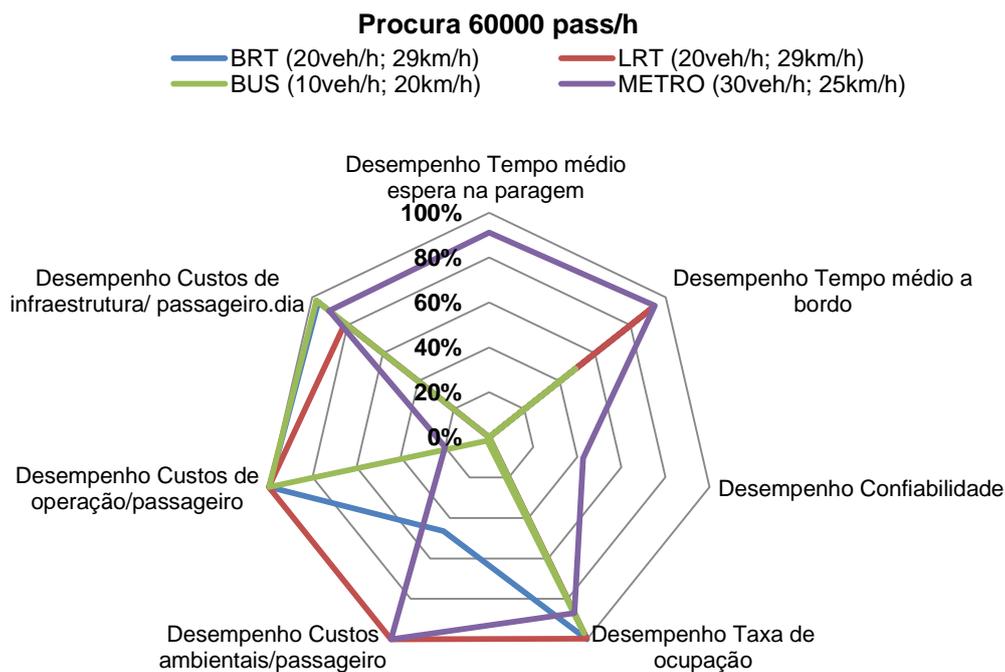


Figura 13 - Desempenho dos modos de transporte para a procura de 60000 pass/h

O Quadro 25, apresentado anteriormente, mostrou que o desempenho global do sistema diminuiu ligeiramente (de 78% para 75%) com o aumento da procura de 45000 para 60000pass/h. Através da análise do gráfico da Figura 13 e dos valores apresentados no Anexo III concluiu-se que esta redução se deveu à diminuição do valor do desempenho da variável confiabilidade (de 65 para 43%). Notou-se mais uma vez que os outros modos não mostraram ter capacidade para responder ao aumento do nível de procura, mantendo o mesmo desempenho que apresentaram para os outros níveis. O desempenho do METRO, em termos dos custos de operação por passageiro também diminuiu ligeiramente, sendo que esta variável aumentou de 1,5 para 1,6 €/pass, pois para o METRO o valor de custo de operação unitário foi dado em pass-km. A variável taxa de ocupação foi a única variável a melhorar o seu comportamento no sistema METRO (de 69% para 82%), para este nível de procura.

III.6 Conclusões

Com os resultados do modelo de simulação começou-se por analisar cada variável separadamente, para todos os modos e todos os níveis de procura. De forma a avaliar sobre uma base comum de desempenho todas as variáveis, estas foram padronizadas, utilizando valores de referência máximos e mínimos. Por último, foi realizada uma análise multi-critério tendo em conta todas as variáveis consideradas para avaliar o desempenho dos diferentes modos, consoante os diferentes níveis de procura.

Foram retiradas da análise multi-critério as variáveis tempo e custo total de viagem e nível de emissões, por já estarem contabilizadas noutros indicadores, como os custos ambientais por exemplo, no caso das emissões, e foi excluída a variáveis taxa de ocupação máxima por ser um indicador pouco preciso na avaliação através deste modelo, como discutido acima.

Para o nível de procura de **1000pass/h** o modo com melhor desempenho global foi o sistema BUS, seguindo-se o sistema BRT. O sistema LRT revelou maior desempenho no que diz respeito ao indicador confiabilidade, seguindo-se o BRT. O BUS foi o pior sistema em termos de custos ambientais, mas o melhor em termos de custo de operação por passageiro.

Para o nível de procura **5000 pass/h** o sistema LRT foi o modo com melhor desempenho global (84%), seguindo-se o BRT (80%). O sistema BUS revelou o pior nível de desempenho global (51%), mas não se distanciou muito do metro (61%). Por um lado, o melhor desempenho do modo LRT, em comparação com o BRT deveu-se a uma melhor taxa de confiabilidade e melhor desempenho ambiental. Contudo, do ponto de custos de infraestrutura e de taxas de ocupação, o BRT e sistema BUS apresentaram melhores desempenhos do que o sistema LRT. Como as diferenças em termos de tempos de espera e a tempo médio a bordo entre o BRT e o LRT foram pouco significativas, concluiu-se que os dois modos, BRT e LRT, foram então dois modos mais adequados para este nível de procura, de acordo com o modelo estudado.

O sistema LRT também foi o modo com melhor desempenho global (75%), para o **nível de procura de 15000 pass/h**, seguindo-se o METRO (72%). O LRT revelou melhor desempenho do que o METRO em termos de tempo a bordo e de taxa de ocupação mas apresentou um nível desempenho da variável confiabilidade no sistema nulo, assim como os modos BRT e BUS. Este indicador demonstra a incapacidade de transporte destes modos para este nível de procura, tendo alguns passageiros que esperar a passagem de mais de um veículo para aceder ao sistema. A única forma de resolver esta limitação seria aumentar os valores de frequência de serviço. No entanto, valores superiores aos analisados não são usuais para os modos em causa como acima discutido. Desta forma, o METRO foi o único modo capaz de responder a procura de 15000 pass/h, mas com um baixo desempenho a nível de taxa de ocupação e de custos de operação por passageiro.

Para as procuras de **30000, 45000 e 60000 pass/h** concluiu-se que o METRO foi o modo mais adequado, pois apresentou sempre melhor desempenho global, tendo os modos BRT, LRT e

BUS revelou níveis de confiabilidade nulos uma vez mais, não satisfazendo a procura. A taxa de confiabilidade do sistema METRO aumentou com procura de 30000 e 45000 pass/h, por transportar cada vez mais passageiros, melhorando também as suas taxas de ocupação. Porém, para a procura de 60000 pass/h verificou-se uma diminuição do valor do desempenho da variável confiabilidade (de 65% para 43%).

IV Conclusão e desenvolvimentos futuros

A qualidade de vida nas cidades depende em grande medida do planeamento eficiente do sistema de transportes, que melhora a acessibilidade, permite mais escolhas de transporte e contribui para que os investimentos públicos sejam feitos de uma forma eficaz. Um correto planeamento de transportes deve preocupar-se com o uso irracional do carro privado, mitigando as suas consequências do ponto de vista social, económico e ambiental, ao mesmo tempo que deve responder eficazmente à procura pela mobilidade nas cidades. Neste contexto, o transporte público apresenta-se como uma das atividades fundamentais no desenvolvimento da cidade, sendo a resposta às necessidades de mobilidade da população que visa a sustentabilidade.

O objetivo principal desta dissertação foi desenvolver um modelo baseado em simulação que avaliasse o desempenho de diferentes modos de transporte num corredor de transporte público sujeito a diferentes tipologias de procura (Capítulo III). Para tal foi necessário analisar um conjunto de indicadores de desempenho de transportes públicos, baseados na perspetiva da sustentabilidade, e estudar as características de diferentes tipos de exploração. Além disso foram estudados diferentes métodos utilizados na literatura para avaliar o desempenho de sistemas de transportes públicos (Capítulo II).

No **Capítulo II**, concluiu-se que o transporte sustentável deve conciliar os aspetos ambientais, sociais e económicos nas decisões que afetam a atividade de transporte. O planeamento de um sistema de transporte público envolve um conjunto de dificuldades associados à combinação destas áreas e dos interesses dos vários agentes (passageiros, operador e sociedade). Isto está longe de ser uma tarefa fácil, envolvendo um conjunto de desafios políticos, financeiros, técnicos e institucionais.

No planeamento de transportes devem ser estabelecidos parâmetros, através dos quais o sistema possa ser avaliado e monitorizado, de modo a assegurar que os objetivos a curto e a longo prazo são alcançados. As medidas de desempenho são uma ferramenta essencial na análise de desempenho de um sistema de transportes, pois permitem avaliar um espectro específico do serviço, através de indicadores, que mostram o seu progresso até um objetivo estabelecido.

Foram estudadas as diferentes medidas de desempenho, percebeu-se como estas são consideradas no contexto do planeamento de transportes e como podem ser utilizadas no processo de tomada de decisão. Foi possível perceber que os indicadores podem descrever características que mostram o desempenho do sistema segundo diferentes pontos de vista, do operador, dos passageiros e da sociedade e podem ser medidas quantitativas ou qualitativas, como por exemplo o tempo de viagem ou o conforto, respetivamente. Concluiu-se que não

existe um conjunto de indicadores universais e que a escolha de indicadores depende da entidade que realiza o estudo. Contudo, esta escolha deve sempre ser realizada de forma cuidadosa e precisa, os indicadores devem ter em conta as diferentes perspetivas dos vários intervenientes, devem ser corretamente definidos, mensuráveis, compreensíveis, simples e acessíveis.

Neste trabalho foram estudados diferentes modos de transporte, o Bus Rapid Transit, o Autocarro regular, o Light Rail Transit e o Metro. Estes modos distinguem-se entre si segundo o tipo de prioridade do sistema, a tecnologia dos veículos e o tipo de serviço. Foram estudadas as principais características de cada tipo de exploração e os seus padrões de procura.

No **Capítulo III** desenvolveu-se um modelo em simulação, com apoio do programa *Anylogic*, cujo principal objetivo foi reproduzir as operações de um corredor de transporte público, de forma a servir de base a uma avaliação do desempenho entre os quatro modos de transporte público referidos (BRT, LRT, BUS e METRO), sujeitos a diferentes tipologias de procura.

Depois de desenvolvido e testado o modelo de simulação, foram experimentados diferentes cenários variando os parâmetros frequência, capacidade e velocidade do veículo, para os níveis de procura 1000, 5000, 15000, 30000, 45000 e 60000 pass/h (Quadro 26).

PARÂMETROS	MODOS DE TRANSPORTE			
	BRT	LRT	BUS	METRO
Frequência [veh/h]	6, 13, 20	6, 13, 20	2, 6, 10	6, 18, 30
Capacidade total do veículo [pass]	185	300	100	1500
Velocidade operacional [Km/h]	15, 22, 29	15, 22, 29	8, 14, 20	25, 35, 45

Quadro 26 - Configurações de frequência, capacidade e velocidade operacional do veículo experimentadas no modelo para cada nível de procura

Inicialmente, os indicadores escolhidos para a avaliação do desempenho do sistema foram os seguintes:

Indicadores de desempenho	
1. Tempo médio de espera na estação [min]	7. Emissões [goe]
2. Tempo médio a bordo [min]	8. Custos ambientais [€/pass]
3. Tempo médio total [min]	9. Custos de operação [€/pass]
4. Confiabilidade [%]	10. Custos de infraestrutura [€/pass.dia]
5. Taxa de ocupação [%]	11. Custos ambientais e operação [€/pass]
6. Taxa de ocupação máxima [%]	

Quadro 27 - Indicadores de desempenho

Com os resultados do modelo de simulação, foi feita uma análise multi-critério para avaliar o desempenho dos diferentes modos, consoante os diferentes níveis de procura. Foram retiradas desta análise as variáveis tempo e custo total de viagem e nível de emissões, por serem variáveis já contabilizadas noutros indicadores, como os custos ambientais (por exemplo, no caso das emissões) e também se excluiu a variável taxa de ocupação máxima por ser um indicador pouco preciso na avaliação através deste modelo. Para comparar o desempenho para os restantes indicadores, padronizaram-se as variáveis, através de uma padronização hipergeométrica, numa primeira fase e depois através de uma padronização por intervalos usando valores de referência, isto é, convertendo os valores absolutos dos indicadores de desempenho em percentagens relativas entre um limite inferior e um superior previamente definidos.

Através da análise multi-critério foi possível concluir que para **o nível de procura de 1000pass/h** o sistema BUS apresentou o melhor desempenho global e o melhor desempenho na maioria dos indicadores e, por isso, revelou ser a melhor solução para este nível de procura.

Para o **nível de procura 5000pass/h** os sistemas BRT e LRT foram os dois modos mais adequados, de acordo com o modelo estudado. O modo LRT revelou um nível de desempenho ligeiramente superior do que o BRT (84 e 80%, respetivamente), pois apresentou melhores taxas de confiabilidade e melhor desempenho ambiental. Porém, do ponto de vista de custos de infraestrutura e de taxas de ocupação o BRT e o sistema BUS apresentaram melhores desempenhos do que o sistema LRT.

No caso da procura de **15000pass/h**, o METRO foi o único modo capaz de responder a este nível de procura, mas com um baixo desempenho a nível de taxa de ocupação e de custos de operação. Os outros três modos apresentaram um nível de desempenho da variável confiabilidade no sistema nulo. Contudo, o sistema LRT apresentou melhor desempenho global do que o METRO (75% para o LRT e 72% para o METRO). O LRT revelou melhor desempenho em termos das variáveis tempo a bordo e de taxa de ocupação. O modo BRT revelou ser uma solução menos adequada para este nível de procura (desempenho global de 64%), porque, além de não conseguir satisfazer a procura como foi referido, apresentou níveis de desempenho baixos em tempos de espera médios na paragem e desempenho ambiental.

Para as procuras de **30000, 45000 e 60000pass/h** concluiu-se que o modo com melhor desempenho foi o METRO, pois apresentou sempre melhor desempenho global e os restantes modos revelaram níveis de confiabilidade nulos, não satisfazendo a procura.

Este estudo permitiu sistematizar os diferentes tipos de indicadores que podem ser utilizados para avaliar um sistema de transportes. Além disso, com este trabalho foi possível encontrar uma forma simples de simular e avaliar, através de indicadores, a plausibilidade da introdução de diferentes modos de transportes num corredor.

O modelo desenvolvido e a metodologia aplicada apresentaram algumas limitações, cuja resolução poderia passar por desenvolvimentos futuros desta dissertação.

Em primeiro lugar, ao se estudarem os indicadores de desempenho percebeu-se que alguns destes não seriam facilmente contabilizados na avaliação efectuada. De facto, não foi possível ter em conta indicadores importantes, especialmente do ponto de vista do passageiro, que seriam interessantes incluir. Esta limitação deveu-se sobretudo ao facto destas medidas partirem de variáveis qualitativas, de características individuais e de preferências, não contabilizadas no modelo de simulação.

Os níveis de procura testados para o corredor revelaram que uma linha única de transporte não foi suficiente para satisfazer a procura, ou seja, para os níveis de procura referidos seriam necessárias mais linhas de transporte, que fizessem serviços complementares.

Outro passo futuro para este estudo seria utilizar este modelo com parâmetros relativos a um dia inteiro e não só à hora de ponta.

Dado o pequeno comprimento do corredor e os elevados níveis de procura testados, alguns destes resultados seriam dificilmente transferíveis para uma rede. No entanto, o método de análise poderá ser replicado para sistemas em rede e corredores reais. Sugere-se, por isso, que no futuro este modelo possa ser transferido para uma rede inteira. A partir de um modelo de uma rede seria possível testar-se combinações de diferentes modos de exploração nas diferentes linhas de transporte colectivo e analisar quais seriam as melhores combinações, encontrando soluções na fronteira de Pareto. A fronteira de Pareto consiste numa solução optima que engloba problemas com vários objectivos. Uma solução optima de Pareto é a solução ótima que engloba *um trade-off* entre objectivos.

Por fim, destaca-se um estudo a desenvolver que poderia trazer uma grande contribuição para este trabalho. A análise realizada não permitiu realizar uma avaliação suficientemente detalhada sobre a realidade por não ter contabilizado o impacto que cada indicador pode ter na avaliação global de um modo de transporte, pois foram considerados pesos uniformes para todos. Desta forma, a análise devia ser sujeita à contribuição dos decisores políticos ou dos planeadores, de como estes ponderam a importância de cada indicador num sistema de transporte público e quais os limites de aceitabilidade de cada um destes indicadores. Desta forma, esta metodologia poderia ser uma ferramenta muito útil para ajudar o processo de decisão do planeamento de transportes públicos.

Bibliografia

- ADC (Agência para o Desenvolvimento e Coesão), *A Avaliação do Desenvolvimento Socioeconómico, MANUAL TÉCNICO II: Métodos e Técnicas Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação: Análise Multicritério*, pp 1–15, 2014
- ADC (Agência para o Desenvolvimento e Coesão), *Instrumentos de Enquadramento das Conclusões da Avaliação Análise Custo-Benefício Circunstâncias em que se aplica*, pp 1–14, 2014
- Arundell, L., *Estimating Greenhouse Emissions from Australian Capital Territory Travel Modes*, pp 1–30, 2012
- Bana, C. A., Corte, J. De, & Vansnick, J., *MACBETH*, pp 0–40, 2003
- Barnum, Darold T.; McNeil, Sue; Hart, J., *Comparing the Efficiency of Public Transportation Subunits Using Data Envelopment Analysis*, *Journal of Public Transportation*, 27, pp. 413–415, 2007
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. *The valuation of reliability for personal travel*, 37, pp 191–229, 2001
- Beirão, G., & Sarsfield Cabral, J. a., *Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study*. *Transport Policy*, 14, nº6, pp 478–489, 2007
- Bergh, J. C. J. . Van Den, *Monetary Valuation of the Social Costs of CO 2 Emissions : A Critical Survey*, 2013
- Bhagavath, V., *Technical Efficiency Measurement by Data Envelopment Analysis : An Application in Transportation*, pp 60–72, 2006
- Cardoso, C. P., *Acessibilidade - alguns conceitos e indicadores*, pp 2–6, 2006
- Chen, X., Yu, L., & Wang, Y., *Analyzing the Effect of BRT Policy Strategies on CO 2 Emissions : a Case Study of Beijing*, 2013
- Dalton, D., *Transportation Data and Performance Measurement. In 26th Annual Meeting on Performance Measures to Improve Transportation Systems and Agency Operations*, Irvine, 2000
- Desautels, A., *Improving the transfer experience at intermodal transit stations through innovative dispatch strategies*, 2006
- Dhingra, C., *Measuring Public Transport Performance. Lessons for Developing Cities*, 2011
- Diana, M., & Idraulica, D., *Performance Indicators for urban public transport systems with a focus on transport policy effectiveness issues*, pp 1-25, 2010
- Eboli, L., & Mazzulla, G., *How to Capture the Passengers' Point of View on a Transit Service through Rating and Choice Options*, *Transport Reviews*, 30, nº4, pp 435–450, 2010
- Eboli, L., & Mazzulla, G., *A methodology for evaluating transit service quality based on subjective and objective measures from the passenger's point of view*, *Transport Policy*, 2011

- Eboli, L., & Mazzulla, G., *Performance indicators for an objective measure of public transport service quality*, 51, pp 1–21, 2012
- EPA, *Guide to Sustainable Transportation Performance*, 2011
- Ferreira, L., Lake, M., *Towards A Methodology To Evaluate Public Transport Projects*, 2002
- Fielding, J., *For bus transit*, 19, pp 73–82, 1985
- Finn, B., Heddebaut, O., Rabuel, S., *Bus with a high level of service (BHLS): the European BRT concept*, 33, 2010
- Geurs, K. T., Van Wee, B., *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions*. *Journal of Transport Geography*, 12, n°2, pp 127–140, 2004
- Guo, Z., Wilson, N. H. M., *Assessing the cost of transfer inconvenience in public transport systems: A case study of the London Underground*, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45, n°2, pp 91–104, 2011
- Hadas, Y., & Ceder, A. *Public Transit Network Connectivity*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp 1–8, 2010
- Hall, C. H., *A Framework for Evaluation and Design of an Integrated Public Transport System*, 2006
- HCM, *Highway Capacity Manual*, 2000
- Hensher, D., & Golob, T., *Bus rapid transit systems: a comparative assessment*. *Transportation*, 35, n°4, 2008
- Hidalgo, D., Muñoz, J. C., *Public Transport A Review of Technological Improvements in Bus Rapid Transit BRT and Buses of High Level of Service BHLS*, 2013
- Lee, Y., *Comparative Measures for Transit Network Performance Analysis*, 47, n°3, 2008
- Lem, L. L., Li, J., & Wachs, M. *Comprehensive Transit Performance Indicators*, Berkeley, 1994
- Litman, T., *Sustainable Transportation Indicators*, 2008
- Litman, T., *A Good Example of Bad Transportation Performance Evaluation*, 2009
- Litman, T. *Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning*, pp 10–15, 2011
- Litman, T. *Well Measured*, pp 10–15, 2013
- Macário, R., Garcia, C., Ribeiro, J., & Martinez, L., 100172-S41689 Technical Report Urban Mobility Sector, (2012).
- Maria, A., *Introduction to Modeling and Simulation*, pp 7–13, 1997
- Metropolitan Transportation Commission, *Transit Connectivity Report*, 2005
- Mishra, S., Welch, T. F., Jha, M. K., *Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks*, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46, n°7, pp 1066–1085, 2012

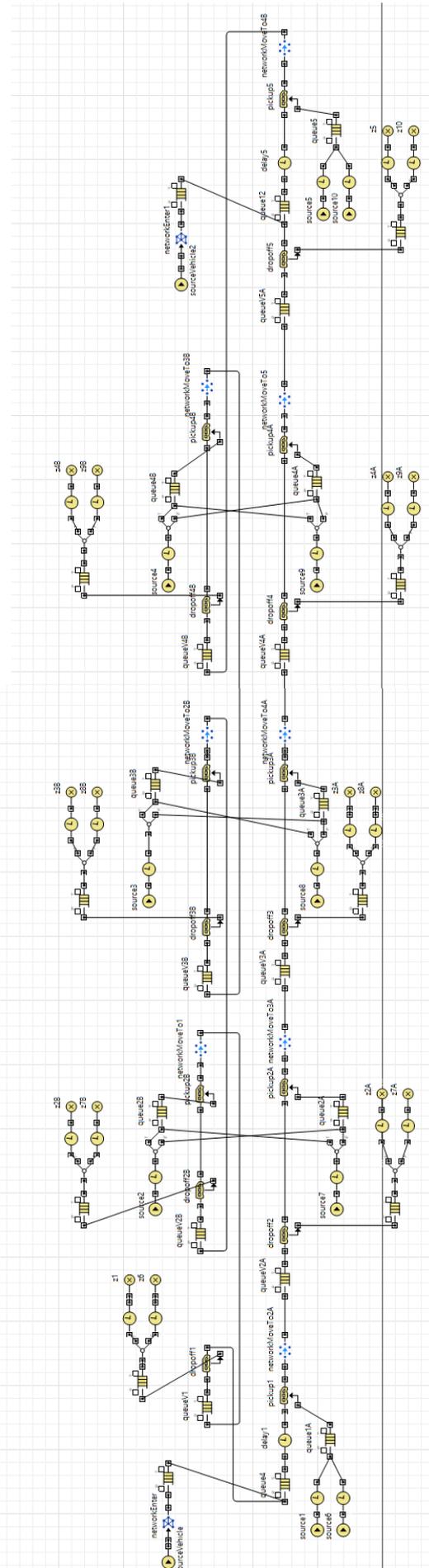
- Murray, A. T., Wu, X., *Accessibility tradeoffs in public transit planning. Journal of Geographical Systems*, 5, nº1, pp 93–107, 2003
- OECD, *Indicators for the Integration of Environmental Concerns Into Transport Policies*, Paris, 1999
- Orth, H., Nash, A., *High quality public transport and promotion of non-motorized transport - compromise or complement?* pp 1–21, 2012
- Ortúzar, J. de D., Willumsen, L. G., *Modelling Transport*, 2001
- Rodriguez, D. A., Targa, F., *Value of Accessibility to Bogota's Bus Rapid Transit System*, 2003
- Sampaio, R., Neto, O.; Sampaio, Y. *Efficiency Analysis of Public Transport Systems: Lessons for Institutional Planning*, pp 1–15, 2005
- Tahmasseby, S., *Reliability in Urban Public Transport Network Assessment and Design*, 2009
- Talley, W. K., *A comparison of two methodologies for selecting transit performance indicators. Transportation*, 13, nº3, pp 201–210, 1986
- Transportation Research Board, *A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System*, Report 88, 2003a
- Transportation Research Board, *Bus Rapid Transit*, Report 90, 2003b
- Transportation Research Board, *Transit Capacity and Quality of Service Manual*, Report 1, 2003c
- United States Department of Transportation, *Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making*, 2009
- Vuchic, V. R., *Urban Public Transportation, Systems and Technology*, pp 673, 1981
- Vuchic, V. R. *Bus Semirapid Transit Mode Development and Evaluation. Journal of Public Transportation*, 5, 2002
- Vuchic, V. R. *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*, 664, 2005

Sites consultados:

- FHWA, <http://www.fhwa.dot.gov/steam/faq.cfm>, visitado em Maio de 2014
- Global Data BRT, <http://www.brtdata.org>, visitado em Fevereiro de 2014
- MACBETH, <http://www.m-macbeth.com/en/m-home.html>, visitado em Agosto de 2014

Anexos

Anexo I – Esquema ilustrativo do Ambiente de Simulação



Anexo II – Matriz Pares Origem Destino utilizada no modelo de simulação

O/D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1		0,50%	0,10%	3,00%	0,95%	2,00%	1,60%	1,30%	0,20%	1,20%	10,85%
2	0,90%		2,65%	0,05%	1,00%	2,50%	0,70%	0,04%	1,40%	0,90%	10,14%
3	2,05%	1,00%		0,60%	0,50%	0,15%	0,10%	3,00%	1,60%	1,12%	10,12%
4	1,05%	0,15%	1,40%		1,20%	0,40%	1,65%	1,60%	2,30%	0,09%	9,84%
5	1,50%	0,25%	0,20%	0,02%		0,66%	0,25%	3,70%	0,70%	1,10%	8,38%
6	0,65%	2,00%	1,60%	3,50%	0,60%		3,09%	0,15%	1,05%	0,25%	12,89%
7	0,05%	0,10%	0,30%	1,05%	1,05%	0,20%		1,60%	2,09%	1,20%	7,64%
8	1,05%	0,17%	0,60%	1,30%	0,10%	0,90%	0,50%		1,03%	2,70%	8,35%
9	1,30%	1,30%	1,55%	2,50%	1,60%	3,30%	0,20%	0,09%		1,00%	12,84%
10	0,65%	2,05%	0,30%	0,20%	0,15%	0,15%	2,85%	0,80%	1,80%		8,95%
	9,20%	7,52%	8,70%	12,22%	7,15%	10,26%	10,94%	12,28%	12,17%	9,56%	100,00%

Anexo III – Indicadores de desempenho para os diferentes níveis de procura estudados

Procura [pass/h]	1000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	6	20	6	30
Velocidade [Km/h]	29	29	20	25
Tempo médio de espera na paragem [min]	5,1	1,6	5,2	1,1
Tempo médio a bordo [min]	9,7	5,4	10,5	5,4
Número de passageiros	1598	1704	1525	1548
Confiabilidade [%]	0,8	0,9	0,8	77,4
Taxa de ocupação	40,7	10,8	46,0	1,6
Custos ambientais [€/pass]	2,0E-04	0,0E+00	4,1E-04	0,0E+00
Custos de operação [€/pass]	0,023	0,092	0,025	1,630
Custos de infraestrutura [€/pass]	0,5	4,8	0,2	16,9

Desempenho Tempo médio espera na paragem	83%	95%	83%	96%
Desempenho Tempo médio a bordo	53%	96%	45%	96%
Desempenho Confiabilidade	60%	70%	55%	55%
Desempenho Taxa de ocupação	39%	4%	76%	0%
Desempenho Custos ambientais/passageiro	70%	100%	60%	100%
Desempenho Custos de operação/passageiro	100%	99%	100%	79%
Desempenho Custos de infraestrutura/ passageiro.dia	85%	0%	97%	0%
Desempenho médio	0,70	0,66	0,74	0,61

Procura [pass/h]	5000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	20	20	10	30
Velocidade [Km/h]	29	29	20	45
Tempo médio de espera na paragem [min]	2,8	1,6	27,0	1,0
Tempo médio a bordo [min]	5,6	5,5	10,2	3,7
Número de passageiros	7585	8443	2937	8619
Confiabilidade [%]	75,9	84,4	29,4	86,3
Taxa de ocupação [%]	79,7	55,2	90,0	9,0
Custos ambientais [€/pass]	1,45E-04	0,00E+00	2,54E-04	0,00E+00
Custos de operação [€/pass]	0,017	0,020	0,015	1,392
Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,13	0,98	0,08	3,03

Desempenho Tempo médio espera na paragem	91%	95%	10%	94%
Desempenho Tempo médio a bordo	94%	95%	48%	100%
Desempenho Confiabilidade	52%	69%	0%	72%
Desempenho Taxa de ocupação	84%	56%	96%	7%
Desempenho Custos ambientais	44%	100%	2%	100%

Desempenho Custos de operação	100%	100%	100%	38%
Desempenho Custos de infraestrutura	96%	71%	98%	19%
Desempenho médio	0,80	0,84	0,51	0,61

Procura [pass/h]	15000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	20	20	10	30
Velocidade [Km/h]	29	29	20	45
Tempo médio de espera na paragem [min]	25,2	14,2	39,2	1,7
Tempo médio a bordo [min]	5,9	5,8	10,2	4,0
Número de passageiros	8135,0	13125,0	2900,0	25395,0
Confiabilidade [%]	27,1	43,8	9,7	84,7
Taxa de ocupação [%]	92,4	91,0	90,4	42,0
Custos ambientais [€/pass]	1,4E-04	0,0E+00	2,5E-04	0,0E+00
Custos de operação [€/pass]	0,016	0,013	0,015	1,486
Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,1	0,6	0,1	0,9

Desempenho Tempo médio espera na paragem	16%	53%	0%	94%
Desempenho Tempo médio a bordo	91%	92%	48%	100%
Desempenho Confiabilidade	0%	0%	0%	69%
Desempenho Taxa de ocupação	99%	98%	97%	40%
Desempenho Custos ambientais	46%	100%	4%	100%
Desempenho Custos de operação	100%	100%	100%	27%
Desempenho Custos de infraestrutura	97%	82%	98%	73%
Desempenho médio	0,64	0,75	0,49	0,72

Procura [pass/h]	30000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	20	20	10	18
Velocidade [Km/h]	29	29	20	35
Tempo médio de espera na paragem [min]	35,0	29,1	43,7	1,7
Tempo médio a bordo [min]	5,8	5,8	10,3	5,6
Número de passageiros	7991	13095	2910	49838
Confiabilidade [%]	13,3	21,8	4,9	83,1
Taxa de ocupação [%]	92,8	92,6	90,4	66,4
Custos ambientais [€/pass]	1,4E-04	0,0E+00	2,4E-04	0,0E+00
Custos de operação [€/pass]	0,016	0,013	0,015	1,246
Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,1	0,6	0,1	0,5

Desempenho Tempo médio espera na paragem	0%	3%	0%	94%
Desempenho Tempo médio a bordo	92%	92%	47%	94%
Desempenho Confiabilidade	0%	0%	0%	66%
Desempenho Taxa de ocupação	100%	99%	97%	69%
Desempenho Custos ambientais	47%	100%	8%	100%
Desempenho Custos de operação	100%	100%	100%	39%
Desempenho Custos de infraestrutura	97%	82%	98%	85%
Desempenho médio	0,62	0,68	0,50	0,78

Procura [pass/h]	45000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	20	20	10	30
Velocidade [Km/h]	29	29	20	25
Tempo médio de espera na paragem [min]	37,9	33,2	44,0	1,2
Tempo médio a bordo [min]	5,8	5,8	10,0	5,5
Número de passageiros	8371,0	12586,0	2998,0	74089,0
Confiabilidade [%]	9,3	14,0	3,3	82,3
Taxa de ocupação [%]	92,5	93,0	90,1	69,2
Custos ambientais [€/pass]	1,3E-04	0,0E+00	2,5E-04	0,0E+00
Custos de operação [€/pass]	0,015	0,014	0,015	1,493
Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,1	0,7	0,1	0,4
Desempenho Tempo médio espera na paragem	0%	0%	0%	96%
Desempenho Tempo médio a bordo	92%	92%	50%	95%
Desempenho Confiabilidade	0%	0%	0%	65%
Desempenho Taxa de ocupação	99%	100%	97%	72%
Desempenho Custos ambientais	49%	100%	3%	100%
Desempenho Custos de operação	100%	100%	100%	27%
Desempenho Custos de infraestrutura	97%	81%	98%	89%
Desempenho médio	0,62	0,68	0,49	0,78

Procura [pass/h]	60000			
Capacidade [pass]	185	300	100	1500
Frequência [veh/h]	20	20	10	30
Velocidade [Km/h]	29	29	20	25
Tempo médio de espera na paragem [min]	38,9	35,9	44,3	2,7
Tempo médio a bordo [min]	5,7	5,8	10,1	5,6
Número de passageiros	7815,0	13036,0	2872,0	85594,0
Confiabilidade [%]	6,5	10,9	2,4	71,3
Taxa de ocupação [%]	93,0	92,8	90,5	82,0
Custos ambientais [€/pass]	1,4E-04	0,0E+00	2,5E-04	0,0E+00
Custos de operação [€/pass]	0,016	0,013	0,015	1,632
Custos de infraestrutura [€/pass.dia]	0,1	0,6	0,1	0,3
Desempenho Tempo médio espera na paragem	0%	0%	0%	91%
Desempenho Tempo médio a bordo	93%	92%	49%	94%
Desempenho Confiabilidade	0%	0%	0%	43%
Desempenho Taxa de ocupação	100%	100%	97%	87%
Desempenho Custos ambientais	46%	100%	2%	100%
Desempenho Custos de operação	100%	100%	100%	20%
Desempenho Custos de infraestrutura	96%	82%	98%	90%
Desempenho médio	0,62	0,68	0,49	0,75

