

PARADIGMAS PARA A GERAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO DE CONDUTORES DE SISTEMAS DE METROPOLITANO

MANUEL DE MEDINA PRATA PINHEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO E
TRANSPORTES**

Professor Doutor António José Fidalgo do Couto

Professor Doutor António Manuel Cabral Vieira Lobo

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Vi-te a trabalhar o dia inteiro, Construir as cidades para os outros

Sérgio Godinho

AGRADECIMENTOS

A todos os professores que me acompanharam neste percurso escolar e académico, e em especial aos *Professores António Couto e António Lobo*, agradeço os conhecimentos transmitidos, a orientação, o apoio, o tempo dispensado e o incentivo à realização deste trabalho.

À ViaPorto por todas as condições oferecidas, indispensáveis à realização desta dissertação e, em particular ao *Engenheiro Marco Alves*, ao *João Reis* e ao *Carlos Alves* por toda a ajuda ao longo destes meses.

À minha família, particularizando nas pessoas da minha *Mãe*, do meu *Pai* e dos meus irmãos, *João* e *Raul*, pelo importante apoio e pela criação das condições necessárias à realização deste mestrado, pelo seu constante incentivo, encorajamento e motivação.

Aos meus amigos que sempre estiveram presentes e que estiveram comigo em todos os momentos.

A todas os grupos e associações a que pertenci, que muito contribuíram para complementar a minha formação académica.

Ao Metro do Porto, que ao longo destes 5 anos de formação académica me transportou.

RESUMO

O Metro do Porto é um elemento estrutural da cidade e correspondente área metropolitana. Todos os dias, milhares de pessoas utilizam este meio de transporte e como tal, o seu correto funcionamento assume uma particular importância num cenário futuro em que os transportes coletivos se antevêm como preponderantes.

Por isso, esta dissertação foca-se na otimização das escalas de serviço dos condutores de metropolitano, na ViaPorto, empresa à qual foi atribuída a subconcessão do Metro do Porto. Nesta concessão, é requerido à empresa o cumprimento de um certo horário ou frequência, devendo efetuar a gestão da rede, dos trabalhadores e do material circulante. Assim, também fica da sua responsabilidade a definição das viagens e a distribuição dos condutores pelas mesmas.

Deste modo surge o problema de otimização das escalas de serviço que, como se compreenderá é bastante complexo, devendo atender a múltiplas restrições espaciais e temporais, associadas à rede, aos veículos e aos maquinistas. Visto que a rede do Metro do Porto está em vias de ser alargada, é necessário imaginar vários cenários de operação para estas mesmas expansões, procurando resolver este problema para cada um dos cenários, como é feito aqui para o prolongamento da linha D até à estação de Vila D'Este.

O trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica, percorrendo todas os métodos mais comuns para solucionar este problema, desde o agendamento das viagens e da sua associação aos veículos, a geração de escalas de serviço em si e à sua associação aos condutores, de forma integrada ou não. Analisa-se de uma perspetiva histórica a evolução, desde as primeiras abordagens ao tema à investigação mais recente e às perspetivas de investigação futura.

De seguida enquadra-se o problema, procurando dar uma ideia geral sobre o Metro do Porto, a ViaPorto e todas as restrições que poderão vir a afetar a solução dos problemas, a nível da rede, já abordando expansão em estudo, dos veículos ou do contrato de trabalho dos motoristas e do acordo de empresa que o estabelece.

O capítulo seguinte serve para fazer uma descrição do processo atualmente em uso, utilizando o software HASTUS. Mostrar-se-á que dados devem ser introduzidos, e como estes devem ser trabalhados de forma a ter um modelo fiel à realidade. Nesta parte também se tenta demonstrar e analisar como, recorrendo ao programa, se resolvem os problemas de agendamento dos veículos, da geração de escalas de serviço e da sua associação a cada condutor.

Posto isto, utilizando o mesmo software, criam-se cenários alternativos para a operação na linha D, após a expansão em construção. Abordam-se dois cenários principais: um primeiro onde todos os veículos percorrem toda a linha normalmente, seguindo até Vila D'Este e um segundo onde metade dos mesmos ficam-se apenas pela estação de Santo Ovídio, ficando a frequência no troço Santo Ovídio – Vila D'Este reduzida a metade. Para ambos os cenários serão testados diferentes frequências de passagem.

Por fim, tiram-se algumas conclusões da comparação entre ambos os cenários, bem como do trabalho como um todo, e estabelecem-se algumas diretrizes para investigação futura.

PALAVRAS-CHAVE: Metro do Porto, Escalas de Serviço, Otimização, Transportes, Mobilidade

ABSTRACT

Metro do Porto is a structuring element of the city of Porto and the corresponding metropolitan area. Every day, thousands of people use this mean of transportation and, therefore, its correct functioning acquires a decisive importance, principally, in a future where public transportation is expected to be determinant.

For this reason, this work focuses on the optimization of the work scheduling of Porto metro's drivers working at ViaPorto, the sub concessionaire of the system's operations. This company is required to ensure a certain timetable or frequency, being responsible for all the network, the drivers and rolling stock. This way, the trip definition, and the driver distribution on them are also under the company responsibility.

Thus, the optimization of the work scheduling of the drivers arises. It is, understandably, a complex problem, due to the multiple space and time restrictions, related to the network, the vehicles, or the drivers. As the current *Metro do Porto* network is being extended, it is necessary to imagine several operation scenarios for those expansions, aiming to solve the problem for each one of them. In this paper, this will be done for the Line D extension, until *Vila D'Este* station.

This work begins with a literature review, covering all the most common methods for solving this problem, from the vehicle and crew scheduling to the crew rostering, in an integrated way or not. It will also be analysed the historical evolution, since the first papers on the theme, to the most recent investigation and to the future investigation outlooks.

Next, the problem is framed, seeking to present an overall picture of *Metro do Porto*, *ViaPorto*, and all the restrictions which could affect the solution, related with the network, abording the studied extension, with the vehicles, or with the drivers' work conditions set up on the collective agreement.

The following chapter will be a description of the process which is, nowadays, in use, and uses the HASTUS software. It will be presented which data must be introduced in the software and how they should be managed, in order to have a true-to-life model. In this part, it will also be showed how, using the problem, it is possible to solve the vehicle scheduling, crew scheduling, and crew rostering problem.

Subsequently, the different scenarios for the operation in line D, after the expansion, are created, using the same software. Two main scenarios are discussed: a first one where all the vehicles run along the entire line, until *Vila D'Este* and a second one where half of the vehicles are kept in Santo Ovídio station, with the frequency in *Santo Ovídio – Vila D'Este* section being halved. For both cases, several frequency examples are tested.

Lastly, some conclusions on the comparison between both scenarios will be taken as well as on the work as a whole, and some future investigation guidelines.

KEYWORDS: Metro do Porto, Network Expansion, Crew Scheduling, Optimization, Transportation

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	3
2.2. MODELOS HEURÍSTICOS.....	4
2.3. ALGORITMOS DE PARTIÇÃO E GERAÇÃO DE COLUNAS	4
2.4. INTEGRAÇÃO	4
3. ENQUADRAMENTO	7
3.1. O METRO DO PORTO	7
3.1.1. A REDE.....	7
3.1.2. Os VEÍCULOS	8
3.1.3. A LINHA D	9
3.1.4. A EXPANSÃO	10
3.2. A VIAPORTO	11
3.2.1. A EMPRESA.....	11
3.2.2. O ACORDO DE EMPRESA.....	12
4. PROCESSO DE ESCALONAMENTO	13
4.1. O PROGRAMA HASTUS	13
4.2. NOMENCLATURA.....	13
4.3. O MÉTODO UTILIZADO.....	14
4.3.1. INSERÇÃO DOS DADOS.....	14
4.3.1.1. Paradas	14

4.3.1.2. Variantes	15
4.3.1.3. Regras	17
4.3.2. AGENDAMENTO DE VEÍCULOS.....	18
4.3.3. GERAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO	19
4.3.4. ATRIBUIÇÃO DAS ESCALAS DE SERVIÇO	21
4.4. ANÁLISE GERAL	23
5. SIMULAÇÃO DOS DIFERENTES CENÁRIOS.....	25
5.1. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS	25
5.2. PRIMEIRO CENÁRIO	26
5.3. SEGUNDO CENÁRIO.....	27
5.4. CENÁRIO DE VALIDAÇÃO.....	27
5.5. ANÁLISE COMPARATIVA.....	29
6. CONCLUSÕES.....	33
6.1. CONCLUSÕES DO ESTUDO	33
6.2. SEGUIMENTO DA INVESTIGAÇÃO.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Geração de escalas de serviço de forma sequencial	5
Fig. 2 - Diagrama Representativo da Rede do Metro do Porto	8
Fig. 3– Esquema da Expansão da Linha D	9
Fig. 4 – Excerto de um gráfico de circulação.....	19
Fig. 5 – Excerto de uma escala de serviço.....	20
Fig. 6– Esquema da rotação de serviço	21
Fig. 7 – Chegadas alternadas a VLE1 e VLE2	24
Fig. 8 – Esquema dos Potenciais conflitos em VLE	25
Fig. 9 – Inversões no segundo cenário	26
Fig. 10 – Esquema dos potenciais conflitos em SOV	27
Fig.11 – Gráficos comparativos do número de veículos e de condutores	28
Fig. 12 – Gráficos comparativos do custo e do tempo	29
Fig. 13 – Diagrama de carga diário (valores em ano cruzeiro útil médio)	31

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Linhas do Metro do Porto	7
Quadro 2 – Estações da Linha D	9
Quadro 3 – Paradas Criadas.....	14
Quadro 4 – Distâncias e tempos entre paradas	15
Quadro 5 – Variantes Criadas.....	16
Quadro 6– Frequências de Verão 2022, Linha D	18
Quadro 7 – Nº Horário de Passagens (passagens por hora e por sentido, phs) e frequência para os novos cenários	23
Quadro 8 – Resultados para o primeiro cenário	25
Quadro 9 – Resultados para o segundo cenário	27
Quadro 10 – Frequências Variáveis	27
Quadro 11 – Dados Estatísticos das Soluções	29

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Os transportes públicos coletivos são cada vez mais assumidos como uma das principais soluções para a mobilidade urbana, contrariando a dependência do automóvel existente. Em cidades de grande e média dimensão, os sistemas de metropolitano são uma alternativa relativamente eficaz, ecológica e de alta capacidade. Uma vez que não partilham via com o tráfego rodoviário, não entram em conflito direto com o mesmo, evitando os congestionamentos que possam existir, e permitem uma rápida travessia do centro da cidade.

Em particular, o Metro do Porto é utilizado diariamente por milhares de pessoas – em 2021, em média, num dia útil, foram registadas 138 mil validações (Metro do Porto, S.A., 2022) - não sendo uma exceção. Este sistema tem-se mostrado uma parte fundamental da rede de transportes coletivos da Área Metropolitana, facilitando a mobilidade dentro da cidade do Porto, bem como as viagens de e para os concelhos vizinhos de Gondomar, Maia, Matosinhos, Póvoa de Varzim, Vila do Conde e Vila Nova de Gaia. Todo este sistema é necessariamente bastante complexo, envolvendo desde o material circulante, à rede, aos horários e frequências definidas nunca esquecendo os trabalhadores que fazem com que tudo funcione e a população em geral, que deve ser servida da melhor forma. Desta forma, é de grande importância haver uma gestão eficiente, assegurando um bom serviço e despendendo o mínimo de recursos necessários.

Atualmente, está em construção um alargamento da rede, criando uma nova linha, rosa, e estendendo a linha D, para sudeste. Com isto, será necessário reformular parte da operação, procurando sempre o melhor desempenho e atendendo a todas as condicionantes e às várias solicitações que podem surgir. Daqui surge a motivação para esta dissertação, realizada em ambiente empresarial na ViaPorto. Esta empresa é detentora da subconcessão da operação do Metro do Porto, estando a seu cargo toda a gestão do material circulante e dos maquinistas, devendo cumprir os horários e frequências que lhe são solicitados. Com isto, é do interesse da empresa que todo o sistema esteja otimizado, poupando recursos e evitando riscos desnecessários.

Assim, pretende-se contribuir para este escalonamento de veículos e, em consequência, de condutores na linha D do metro já estendida até Vila D’Este. Serão gerados diversos cenários viáveis, recorrendo ao software HASTUS, já utilizado pela empresa, comparando-os entre si e percebendo os ganhos e perdas na aplicação de cada um. Este processo de geração e otimização de escalas será também analisado e enquadrado em termos mais globais, procurando entender o atual estado da arte neste domínio.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação divide-se em seis capítulos. Após esta breve introdução, segue-se o segundo capítulo, onde será feita uma revisão bibliográfica, tentando perceber e expor os vários métodos atualmente existentes para a geração de escalas de serviço, bem como um pouco da teoria que lhes está subjacente.

De seguida, no terceiro capítulo, será feito um pequeno enquadramento do problema, abordando de uma forma mais genérica o Metro do Porto e a sua expansão em curso, bem como a empresa ViaPorto e o seu funcionamento, e as restrições relativas ao contrato de trabalho dos maquinistas.

Por sua vez, no capítulo 4 será detalhado o atual processo de escalonamento utilizado no Metro do Porto, atendendo a todas as condicionantes existentes.

Já no quinto capítulo serão apresentados os cenários criados e será feita uma avaliação comparativa dos mesmos, analisando os prós e os contras de cada e procurando uma solução ótima.

Finalmente, no sexto e último capítulo serão tiradas as conclusões desta avaliação.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Dada a sua complexidade e a importância da sua otimização, o problema da geração otimizada de escalas de serviço para transportes públicos tem sido alvo de estudos por parte de variados autores, ao longo dos anos.

(Wren, A. and Rousseau, J.-M., 1995), definem o escalonamento dos serviços de condutores como a construção de um conjunto de turnos legais, cobrindo todos os blocos de um horário particular de veículos. Estes blocos consistem em porções de trabalho, que se iniciam e terminam numa oportunidade de troca, quando o veículo passa num ponto de rendição pré-estabelecido. Neste trabalho, os autores fazem uma síntese dos métodos utilizados até à época para solucionar o problema, classificando-os de acordo com as suas características. Embora este trabalho tenha sido fundamentalmente direcionado para autocarros, também pode ser aproveitado na análise a sistemas de metropolitano, apesar de algumas condicionantes diferirem para cada meio de transporte. São, entre outros, referidos e sucintamente descritos os sistemas HOT, IMPACS e HASTUS, os mais utilizados na época.

Até à década de 1970, embora se soubesse que seria possível, não existia tecnologia disponível para resolver de forma exata modelos de uma dimensão realista. Desta forma, a investigação concentrava-se em desenvolver modelos heurísticos, ou simplificados (Wren, A. and Rousseau, J.-M., 1995).

Posteriormente, com o desenvolvimento tecnológico, foram criadas soluções combinando as heurísticas até aí desenvolvidas com métodos de programação matemáticos. Na década de 1980 muitos deles já haviam sido aplicados com sucesso, normalmente acompanhados de ferramentas interativas para ajustar a escala. (Wren, A., 1998)

A investigação continua até aos dias de hoje, aperfeiçoando os sistemas existentes e criando outros, acompanhando o desenvolvimento da investigação científica. Um dos pontos mais estudados no presente é a integração da geração diária de serviços (*crew scheduling problem*), com a atribuição destas aos condutores (*crew rostering problem*), já entrando em consideração com fatores como tempo de descanso e férias de cada condutor, e também em alguns casos com a geração dos horários dos veículos, como mostram (Ibarra-Rojas, O.J. [et al.], 2015) e (Zhou, J. [et al.], 2021).

Também se pretende alargar estes estudos a mais meios de transporte, uma vez que numa fase inicial grande parte eram focados em autocarros. Apesar do problema ter muitas semelhanças, atendendo às especificidades de outros meios como o metropolitano, em estudo nesta dissertação, é possível obter melhores resultados.

2.2. MODELOS HEURÍSTICOS

Os modelos heurísticos para a resolução do problema da geração de escalas de serviço em transportes públicos baseiam-se em simplificações do mesmo, muitas vezes tentando reproduzir os processos outrora feitos manualmente, porém de forma automatizada. (Ball, M. [et al.], 1983) descrevem um processo heurístico integrando já a geração de horários tanto para os veículos como para os condutores, afirmando obter resultados bastante satisfatórios.

Mais recentemente, (Liping, Z., 2006), baseando-se na experiência dos planeadores e operadores de autocarros no Reino Unido, desenvolve um modelo heurístico que permite estimar o número de serviços necessários, bem como ter uma ideia da estrutura da escala de serviço. Este modelo, apesar de poder funcionar isoladamente, é útil como auxílio a modelos computacionais exatos, reduzindo a complexidade do problema. O algoritmo separa o horário de ponta da manhã e da tarde, combinando-os posteriormente.

Por sua vez, (Tóth, A. and Krész, M., 2013) chegam a um modelo que permite alterar rapidamente certos parâmetros e comparar as soluções obtidas, atendendo aos objetivos do operador.

2.3. ALGORITMOS DE PARTIÇÃO E GERAÇÃO DE COLUNAS

O problema da geração de escalas de serviço pode ser analisado com um problema de cobertura de conjuntos. Porém, desta forma, é necessário que o modelo escolhido analise todos os serviços possíveis, de forma a escolher a melhor combinação destes, abrangendo todas as necessidades.(Desrochers, M. and Soumis, F., 1989)

Uma das formas mais comuns de o resolver, permitindo obter soluções exatas é recorrendo a métodos de geração de colunas (column generation methods). Este é um algoritmo iterativo, criando dois problemas: O “Master problem”, o problema original, mas apenas com algumas variáveis, e um subproblema que é útil para perceber que mais variáveis se deve acrescentar à análise do principal.(Freling, R. [et al.], 1999) Diversos outros autores utilizaram variações deste algoritmo, tentando obter os melhores resultados enquanto também se reduz o tempo computacional necessário para correr o algoritmo.

2.4. INTEGRAÇÃO

O problema da geração de escalas de serviço, conhecido na literatura internacional como *Crew Scheduling Problem* no contexto do planeamento de transportes, normalmente não está sozinho. Para completar totalmente o escalonamento dos condutores é necessário também resolver o problema associado ao escalonamento dos veículos, *vehicle scheduling problem*, bem como o da associação de cada serviço a um condutor específico, *vehicle rostering problem*. Muitas das vezes, estes três problemas são resolvidos sequencialmente, como é esquematizado de seguida, na Fig. 1(Freling, R. [et al.], 1999).

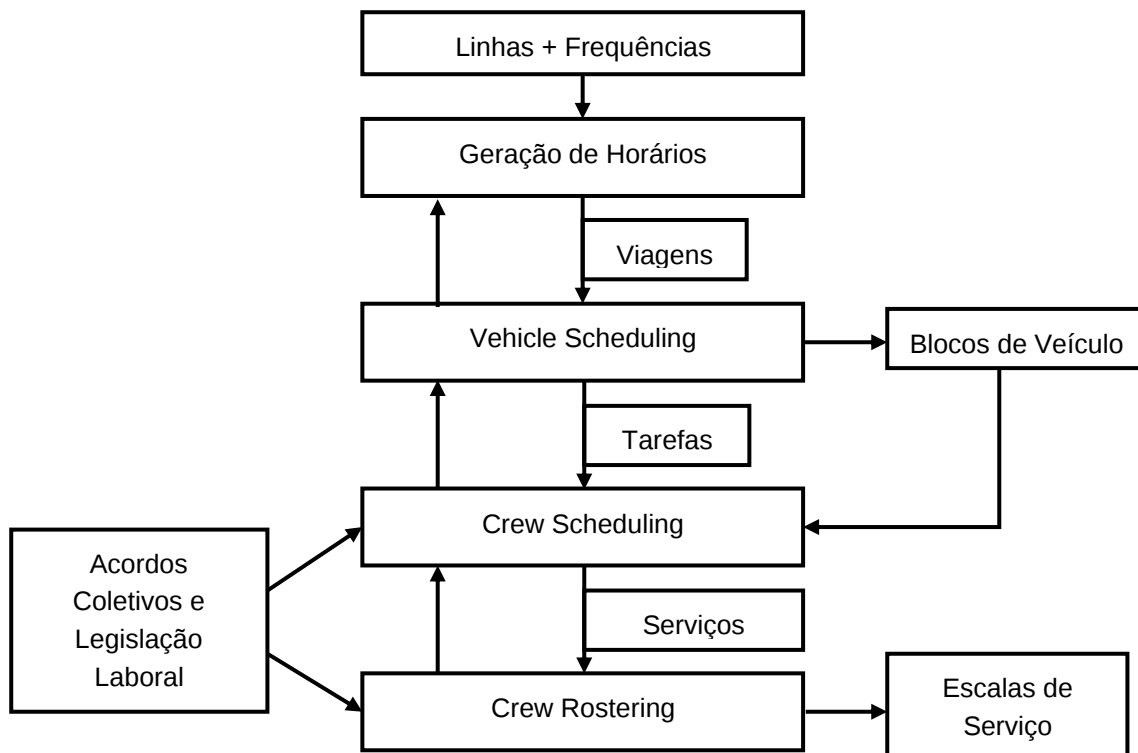


Fig. 1 – Geração de escalas de serviço de forma sequencial

Começa-se por, a partir das características da linha e das frequências solicitadas, gerar o horário de viagens planeadas. A partir deste momento, atribui-se cada viagem a um veículo em particular, ou até mesmo a vários, no caso da existência de composições múltiplas, a um veículo (*Vehicle Scheduling*). Para isto já é necessário um processo de otimização, minimizando o número de composições necessárias e, por conseguinte, o tempo que cada uma destas está parada durante a operação. Assim obtêm-se os blocos de veículo – atividade diária para cada veículo - aos quais, necessariamente, correspondem várias tarefas de condução (porção de viagem entre dois locais onde é possível efetuar a troca de condutores) a ser preenchidas. Ora, é nisso que a fase seguinte do processo consiste. Aqui, as tarefas são associadas entre si, tendo em conta os acordos coletivos de trabalho e a legislação laboral em vigor, de forma a obter serviços (conjunto de trabalho que um condutor deve executar num dado dia) viáveis, legais, e que obedeçam, dentro do possível, às preferências dos condutores e do operador (*Crew Scheduling*). Por fim, dá-se a atribuição de cada um destes serviços a um condutor em particular, também considerando as restrições legais existentes. Assim, apenas no fim de todo este processo será possível obter uma escala de serviço.

Porém, uma vez que a solução final poderá não consistir na mera combinação das soluções ideais de cada processo individual, a investigação tem vindo a perceber que pode haver benefícios na operação resolvendo alguns destes problemas em conjunto, de forma integrada, como a geração de escalas de serviço com a sua distribuição pelos condutores (Xie, L. [et al.], 2012).

3

ENQUADRAMENTO

3.1. O METRO DO PORTO

3.1.1. A REDE

A rede de metropolitano da cidade do Porto é atualmente constituída por 6 linhas comerciais, da A à F, ligando vários municípios da Área Metropolitana, nomeadamente o próprio Porto, Gondomar, Maia, Matosinhos Póvoa de Varzim, Vila do Conde e Vila Nova de Gaia, detalhadas no quadro 1. À exceção da linha D, todas as outras linhas partilham um troço de 14 estações, normalmente designado Tronco Comum, entre as estações “Senhora da Hora” e “Estádio do Dragão”.

Quadro 1 – Linhas do Metro do Porto

Linha	Cor Identificativa	Origem	Destino	Extensão (km)	Nº de Estações
A	Azul	Estádio do Dragão	Senhor de Matosinhos	15,6	23
B	Vermelha	Estádio do Dragão	Póvoa de Varzim	33,6	36
C	Verde	Campanhã	ISMAI	20,8	24
D	Amarela	Santo Ovídio	Hospital São João	8,5	19
E	Roxa	Trindade	Aeroporto	13,1	16
F	Laranja	Fânzeres	Senhora da Hora	16,4	24

De resto, as linhas A e F, a nível de operação e de planeamento, funcionam como uma única, já que os veículos provenientes da estação “Senhor de Matosinhos”, chegados até ao Tronco Comum pela linha A, posteriormente prosseguem até “Fânzeres”, pelo trajeto da linha F. Assim a linha F é uma “linha virtual”. Outra peculiaridade deste sistema, reside na linha B, a mais longa da rede. Nesta, são operados dois tipos de serviço distintos, o regular e o expresso, B e Bx, que não para em todas as estações, reduzindo o tempo de viagem até à Póvoa de Varzim, o ponto da rede mais afastado do Porto.

Ao todo, existem aos dias de hoje 82 estações, distribuídas por 67 km de linha, dispostos como se mostra na figura 2. Em 2021, foram realizadas mais de 41 milhões de viagens de metro, número ainda muito afetado pela pandemia e pelo consequente confinamento. Em 2019 havia sido atingido o maior valor de sempre na rede, 71 milhões de validações.

A estação da Trindade destaca-se como o ponto central da rede, uma vez que permite a troca entre a linha D e as restantes, bem como serve de interface com outros meios de transporte, e se localiza numa zona central da cidade, junto a diversos equipamentos relevantes. A nível de troços, destaca-se uma maior procura em toda a linha D, entre Santo Ovídio e o Hospital São João, e no tronco comum.

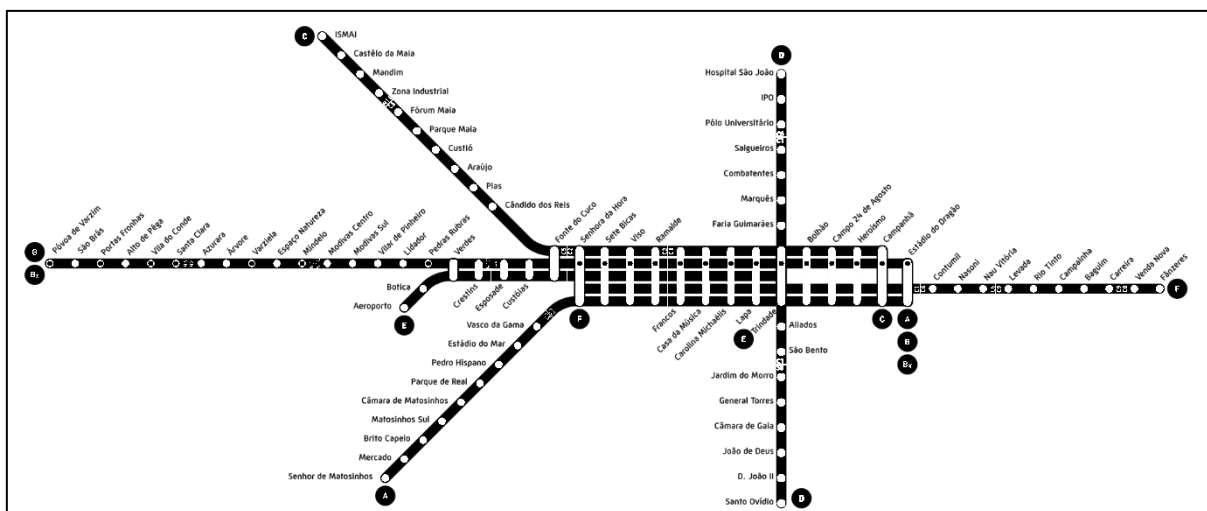


Fig. 2 - Diagrama Representativo da Rede do Metro do Porto

3.1.2. OS VEÍCULOS

Existem atualmente dois tipos de veículos em circulação no sistema de metropolitano do Porto, os EuroTram (ET) e os TramTrain (TT), ambos da marca canadiana Bombardier. De um total de 102 composições, 72 são EuroTram, destinados a percursos mais urbanos. Os restantes 30, mais pesados, destinam-se a trajetos suburbanos, com maiores espaços entre paragens, que permitam atingir maiores velocidades, e circulam principalmente nas linhas B e Bx, e ainda alguns na linha C.

As composições podem circular isoladamente, ou então ser acopladas em pares, de forma a circular uma composição dupla, acomodando mais passageiros. Cada composição só pode ser acoplada a uma do mesmo tipo. No caso dos veículos TT, estes são ainda divididos em 2 subtipos, uma vez que, mesmo não sendo distinguíveis visualmente, as câmaras internas não são compatíveis entre si e desta forma, não é permitida a sua circulação em conjunto.

Atualmente está em curso a aquisição de mais 18 veículos à empresa chinesa CRRC, fazendo face a uma rede cada vez maior. Estes veículos serão adequados para circular em todas as linhas do sistema, aumentando a frota total para 120 veículos.

3.1.3. A LINHA D

Uma vez que esta dissertação incidirá mais sobre a linha D e a sua expansão, de seguida apresentar-se-á a mesma de uma forma mais detalhada. Esta linha, também conhecida como linha amarela graças à cor com que é assinalada nos diagramas, une atualmente as estações do Hospital São João e de Santo Ovídio, contando com um total de 16 estações, especificadas no quadro 2 e divididas entre os concelhos do Porto e de Vila Nova de Gaia.

Quadro 2 – Estações da Linha D

Estação	Código	Concelho	Tipo
Hospital São João	HSJ	Porto	Superfície
IPO	IPO	Porto	Superfície
Pólo Universitário	PUN	Porto	Subterrânea
Salgueiros	SAL	Porto	Subterrânea
Combatentes	CBT	Porto	Subterrânea
Marquês	MRQ	Porto	Subterrânea
Faria Guimarães	FAR	Porto	Subterrânea
Trindade	TRI	Porto	Subterrânea
Aliados	ALI	Porto	Subterrânea
São Bento	SBT	Porto	Subterrânea
Jardim do Morro	JMO	Vila Nova de Gaia	Superfície
General Torres	GTR	Vila Nova de Gaia	Superfície
Câmara de Gaia	CMG	Vila Nova de Gaia	Superfície
João de Deus	PQR	Vila Nova de Gaia	Superfície
D. João II	DJS	Vila Nova de Gaia	Superfície
Santo Ovídio	SOV	Vila Nova de Gaia	Subterrânea

A linha percorre um total de 11754 metros em cerca de 31 minutos, considerando os tempos de paragem nas estações. Esta linha serve diversos equipamentos das cidades por onde passa, sejam eles de saúde, como o Hospital São João, de educação, como as faculdades situadas no pólo universitário da Asprela, administrativos, como as câmaras municipais do Porto e da Gaia, ou comerciais, como a grande loja situada junto à estação “João de Deus”. Esta linha permite ainda o interface com todas as outras linhas da rede do metro, na Trindade, com autocarros em estações como Marquês, Aliados ou Santo Ovídio, ou ainda com comboios, em São Bento e General Torres.

A nível de condução, esta é uma linha bastante exigente e repetitiva. Por isto, torna-se difícil fazer viagens ininterruptas de uma ponta a outra durante um bloco de condução inteiro. Desta forma, atualmente, é introduzido um maquinista “extra”. A cada passagem na estação “Pólo Universitário”, num dos sentidos, existe uma troca de motorista. Este sai do veículo e aguarda pelo próximo na estação (habitualmente 6 minutos, em horário de ponta), saindo o condutor deste e aguardando pelo

seguinte, sucessivamente. A este maquinista suplementar chama-se de *joker*. Isto, apesar de implicar a existência de mais um maquinista em serviço, beneficia a qualidade de serviço e a satisfação dos trabalhadores.

3.1.4. A EXPANSÃO

Em 2017 foram estudadas várias alternativas para esta nova fase de expansão do Metro do Porto. O Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA) desenvolveu um estudo comparativo de 9 opções para esta expansão, procurando estimar a procura que cada uma das alternativas traria, com base na procura da rede atual, sendo estas opções as seguintes:

- Linha Casa da Música – Devesas: Casa da Música – Faculdade de Letras – Arrábida – Candal – Rotunda – Devesas
- Linha Casa da Música – São Bento: Casa da Música – Galiza – Hospital Santo António – São Bento
- Linha Circular: Av. 25 de Abril – Pr. Francisco Sá Carneiro – Covelo – Constituição – Constituição Poente
- Linha ISMAI – Trofa: ISMAI – Ribela – Muro – Serra – Bougado – Pateiras – Senhora das Dores – Trofa – Paradela
- Linha Matosinhos Sul – São Bento - Matosinhos Sul – São Salvador – Parque da Cidade – Molhe – Império – Pasteleira – Fluvial – Lordelo – Botânico – Faculdade de Letras – Galiza – Hospital Santo António
- Linha São Mamede: Faculdade de Engenharia – ISCAP – São Mamede – Pedra Verde – Elaine Sanceau – Xanana Gusmão – São Gens – Matosinhos Praia
- Linha Santo Ovídio Vila d’Este: Santo Ovídio – Escola – Centro Hospitalar VNG – Vila d’Este
- Linha de Gondomar: Freixo – Dr. A. Matos – S.Pinheiro – Hospital Escola – São Cosme – Gondomar
- 2ª Linha da Maia: Enxurreiras – Giesta – São Gemil – Estação – Mosteiro – Arregadas – 5 de Outubro – Músicos – NorteCoop – Lavrador - Chantre

Com base neste estudo, foi decidido avançar para a construção de duas das opções propostas – a linha “São Bento – Casa da Música” que se passará a denominar linha G ou Rosa e a expansão da linha D até Vila d’Este. A primeira, para além de permitir o acesso às zonas onde se encontram as novas estações, facilita a comunicação e transferência de passageiros entre a linha D, em S. Bento, e a parte ocidental do tronco comum e restantes linhas. A abertura da mesma está prevista para 2024.

A segunda, na qual esta dissertação se focará, consiste no alargamento da linha D, para sudeste, até Vila D’Este. Isto permitirá o acesso a grandes centros residenciais, bem como ao Hospital Santos Silva, importante equipamento de saúde do concelho de Vila Nova de Gaia, e à Escola Soares dos Reis. Serão cerca de 3 quilómetros com 3 novas estações – Manuel Leão (MLO), Hospital Santos Silva (HSS) e Vila d’Este (VLE). Está ainda a ser construído ainda um parque de máquinas e operações (PVLE), entre estas duas últimas estações. Este equipamento possibilitará o estacionamento de veículos enquanto não estiverem em utilização, bem como as necessárias operações de manutenção, lavagem e aspiração, que hoje em dia apenas eram possíveis no PMO de Guifões. Junto da estação de Santo Ovídio, será implantada uma inversão (IVSOV3) – uma terceira linha, onde um veículo poderá ser estacionado e a sua marcha invertida sem perturbação da restante circulação. Por fim, para que

todas estas manobras sejam possíveis, serão instaladas 12 agulhas, numeradas com números ímpares e pares, conforme se situarem na linha 1 ou 2, respetivamente.

O esquema da Fig. 3 representa esta expansão da linha D.

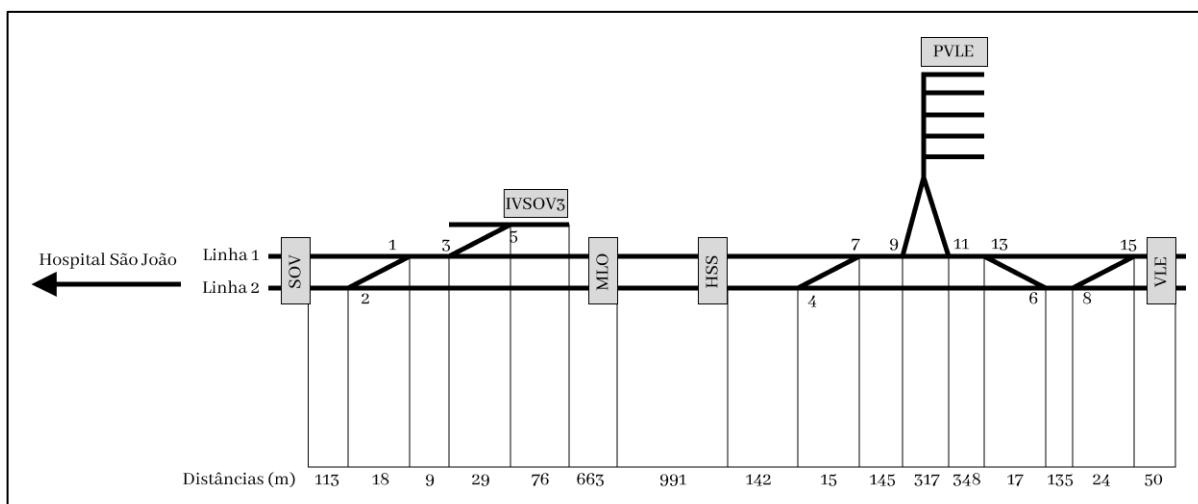


Fig. 3– Esquema da Expansão da Linha D

3.2. A VIAPORTO

3.2.1. A EMPRESA

Criada em 2018, a ViaPorto é uma empresa do Grupo Barraqueiro cuja área de atuação é a operação e manutenção do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto.

De acordo com o previsto na Base XXI das Bases de Concessão da Metro do Porto, S.A. publicadas Decreto-Lei n.º 394-A/98, de 15 de dezembro, e aditamentos subsequentes, a Metro do Porto, S.A. deve subconcessionar a exploração e manutenção da totalidade do sistema de metro ligeiro na área metropolitana do Porto, concessionado pelo Estado à Metro do Porto, S.A. por via dessas mesmas bases de concessão.

Nesses termos, ocorreu em 1 de abril de 2018 o início de um novo contrato de subconcessão para a operação e manutenção do sistema de metro ligeiro na área metropolitana do Porto com a sociedade ViaPorto, Operação e Manutenção de Transportes, Unipessoal Lda. com uma duração de 7 anos.

O contrato de subconcessão de operação e manutenção do sistema de metro ligeiro da área metropolitana do Porto (SMLAMP), celebrado entre a Metro do Porto, S.A. e a ViaPorto, Operação e Manutenção de Transportes, Unipessoal, Lda., deu início a um novo ciclo de operação do mais importante sistema para a mobilidade em toda a Área Metropolitana do Porto.

A subconcessionária obriga-se a realizar a operação e a manutenção do Sistema de Metro Ligeiro em perfeita conformidade com o disposto no referido contrato, bem como com as disposições legais e regulamentares que, em cada momento, estejam em vigor, bem como a implementar e a seguir procedimentos para a identificação, contenção e gestão/resolução de riscos para o Sistema de Metro Ligeiro, para as atividades de exploração, incluindo a operação e manutenção e/ou para os seus utilizadores, clientes e/ou terceiros, que possam ser afetados pela sua atividade.

Desta forma fica a cargo da empresa, ViaPorto, toda a gestão da manutenção, passando pela correta manutenção dos veículos, e da linha, a segurança da circulação e dos passageiros, a limpeza das

estações, a gestão da frota e, fundamentalmente, pela contratação de condutores e gestão dos mesmos, de modo a todas as viagens serem asseguradas e a todos os horários e frequências serem cumpridos.

Uma boa parte destas tarefas, como a limpeza ou a segurança, são realizadas por empresas externas uma vez que não fazem parte da área de trabalho da ViaPorto. No entanto, a gestão da frota e dos condutores é da direta responsabilidade da empresa.

De acordo com o relatório e contas de 2021 do grupo Barraqueiro, nesse ano os gastos com pessoal ascenderam a mais de 10 milhões de euros, o que corresponde a 28% da despesa total. (Barraqueiro SGPS, S.A., 2021) Como será lógico pela sua grande proporção na empresa, a maioria deste valor corresponde aos maquinistas do metropolitano, 206, de um total de 308 trabalhadores. De resto, internamente, a ViaPorto divide-se em departamentos como o de planeamento, responsável por toda a gestão da operação e da frota e por fazer os ajustes necessários no dia-a-dia.

3.2.2. O ACORDO DE EMPRESA

O acordo de empresa, estabelecido entre a empresa e os sindicatos representativos dos trabalhadores, define e regula todas as condições de trabalho de todos os maquinistas, desde o seu salário, ao horário e a todas as outras condições de trabalho. O acordo em vigor foi assinado em março do corrente ano de 2022, entre a ViaPorto e o Sindicato Nacional dos Maquinistas dos Caminhos de Ferro Portugueses (SMAQ), e trouxe diversas melhorias das condições de trabalho, com o compromisso de paz social até ao fim da concessão, em 2025.

Este acordo define restrições para as quais é indispensável olhar quando se aborda assuntos relacionados com horários dos maquinistas, de modo a que todo o planeamento seja legal e proporcione condições motivantes aos maquinistas. Por outro, também são evitados erros humanos causados pela fadiga ou desgaste, uma vez que a condução de um veículo de metropolitano é uma tarefa desgastante e com um elevado grau de responsabilidade. Assim, destas restrições destacam-se:

- Todas as jornadas de trabalho devem acabar no mesmo local onde começam. Caso isso não suceda é necessário disponibilizar um transporte, automóvel ou um outro metropolitano, desde o local de fim da jornada até ao inicial, sendo este tempo ainda pertencente ao horário e, desta forma, pago;
- Amplitude máxima da jornada de 9 horas, entre a hora em que se inicia o serviço até o dar por terminado;
- Hora de almoço com uma duração mínima de 45 minutos e uma duração máxima de 1 hora e meia, não estando a menos de 5 horas do início ou do fim da jornada;
- São também estabelecidos os tempos necessários à entrada e saída de serviço, a preparação de veículos a atividades de acoplamento e desacoplamento, a deslocações, entre outros
- Entre o fim de uma jornada de trabalho e o início da próxima devem existir pelo menos 12 horas de intervalo;
- Um período normal de trabalho semanal de 40 horas, divididas por um máximo de 5 jornadas, podendo estender-se até as 42 horas e 30 minutos, com jornadas diárias com um máximo de 8h30;

Existe ainda a possibilidade de existirem turnos contínuos, com uma duração máxima de 6 horas. No entanto estes praticamente não são utilizados atualmente na ViaPorto.

4

PROCESSO DE ESCALONAMENTO

4.1. O PROGRAMA HASTUS

Todo o processo de geração de horários na ViaPorto é, atualmente, feito recorrendo ao programa informático HASTUS, da empresa canadiana GIRO. Este é um software poderoso e muito completo, que pode ser utilizado nas mais diversas situações de otimização em transportes públicos.

O software é utilizado mundialmente por muitas empresas como por exemplo o grupo *Arriva*, a empresa pública belga *De Lijn*, a empresa ferroviária estatal francesa SCNF, a *Transdev*, ou a RATP, responsável pelos transportes públicos na cidade de Paris, ou ainda o metro de Los Angeles.

Com ele, é possível definir as viagens e horários, criar cenários alternativos ou otimizar a utilização dos veículos e a necessidade de condutores. Dada esta variedade de utilizações e de cenários a que se tem de adaptar, é um programa complexo, mas muito útil em todo o processo de planeamento, gestão e operação de uma rede de transportes, trabalho primordial da ViaPorto.

Para além do programa base, é ainda utilizada a funcionalidade CrewOpt, que permite otimizar o escalonamento de condutores, automatizando a geração da escala de serviço, sendo apenas necessário proceder a alguns ajustes no final.

Para a elaboração do trabalho, uma vez que o seu objetivo era testar diversas soluções, foi utilizada uma versão de teste, HASTEST, de modo a ser assegurado que as escalas reais, utilizadas no dia-a-dia do Metro do Porto, não eram inadvertidamente alteradas. Por outro lado, como se trabalhou num novo cenário, criou-se uma nova versão de linhas, aproveitando a informação da última versão existente.

4.2. NOMENCLATURA

Este software, sendo muito específico para este trabalho, utiliza vocabulário particular, que importa aclarar. Este é, muitas vezes, traduzido para português, de forma literal, da versão original em francês. Assim, surgem alguns termos que não são usuais no vocabulário ou cujo significado é algo diferente do habitual. Logicamente, é indispensável conhecer o seu significado neste contexto, exposto de seguida, de modo a todo o processo ser perceptível.

- Parada: Ponto por onde a linha passa. Pode corresponder a paragens, parques ou a aparelhos de mudança de via, por exemplo.
- Viagem: Trajeto realizado por um veículo, desde o início ao final da linha.
- Tarefa: Porção de viagem entre dois locais onde é possível efetuar a troca de condutores
- Bloco de Veículo: Conjunto de tarefas realizado por um veículo ao longo de um dia.
- Serviço: Conjunto de tarefas realizadas por um condutor, ao longo de um dia de trabalho.
- Escala de Serviço: Conjunto de todos os serviços, a realizar por todos os condutores que trabalhem durante um dia

- Variante: Possível percurso percorrido durante uma viagem. Devem ser criadas variantes para todos os percursos expectáveis. Como a cada variante também está associado um tempo de percurso, caso o mesmo percurso possa ser percorrido em tempos diferentes, devem ser criadas diferentes variantes.

4.3. O MÉTODO UTILIZADO

4.3.1. INSERÇÃO DOS DADOS

O primeiro passo, ao utilizar o software, deve ser introduzir lá os dados do problema para que se retrate a situação pretendida, as suas características e restrições. Esta é uma fase decisiva para todo o processo visto que é essencial que o modelo reproduza fielmente a realidade, a nível da rede, dos veículos e das restrições laborais. Neste caso, como se pretendia analisar a expansão até Vila D'Este da linha D do Metro do Porto, foi necessário acrescentar toda a informação da mesma à informação da linha já existente.

4.3.1.1. Paradas

Para se parametrizar a extensão da linha D começou por se criar os lugares e as paradas correspondentes às novas estações, ao parque de Vila D'Este, e a todos os aparelhos de mudança de via projetados. Para cada estação foi necessário criar duas paradas, uma para cada via, e ainda um lugar de referência, de forma ao programa associar ambas. No caso do Parque de Máquinas e Operações, apesar de este na verdade também ser constituído por múltiplas paradas, optou-se, simplificadaamente, por considerá-lo como apenas uma, ignorando o que se passa no interior do mesmo, à semelhança do que já acontece para o PMO de Guifões. No caso das agulhas (AMV), embora não haja efetivamente uma paragem nas mesmas, é necessário introduzi-las como paradas, para que as fases seguintes do processo sejam viáveis. Para efeitos estatísticos, todos os lugares são também associados a uma zona, normalmente correspondente ao concelho, neste caso Vila Nova de Gaia. Desta forma, foram criadas as paradas mostradas em seguida, no Quadro 3.

Quadro 3 – Paradas Criadas

Parada	Lugar de Referência	Descrição	Via	Parada	Lugar de Referência	Descrição	Via
AMV1	-	-	1	AMV2	-	-	2
AMV3	-	-	1	MLO2	MLO	Manuel Leão	2
MLO1	MLO	Manuel Leão	1	HSS2	HSS2	Hospital Santos Silva	2
HSS1	HSS	Hospital Santos Silva	1	AMV4			2
AMV7	-	-	1	AMV6	-	-	2
AMV9	-	-	1	AMV8	-	-	2
AMV11	-	-	1	VLE2	VLE	Vila D'Este	2

AMV13	-	-	1	AMV5	-	-	-
AMV15	-	-	1	IVSOV3	-	Inversão Santo Ovídio	-
VLE1	VLE	Vila D'Este	1	PVLE	PVLE	PMO Vila D'Este	-

Finalmente, são também assinaladas as paragens onde podem ser efetuadas rendições, entradas e saídas de serviço e onde os condutores poderão fazer as suas refeições, visto haver uma sala disponível para o efeito. Neste caso, isso acontece apenas no Parque de Vila D'Este. Uma vez que este é algo afastado das estações mais próximas (Vila D'Este e Hospital Santos Silva), atendeu-se também ao tempo de deslocação até às mesmas, introduzindo-o no programa, de forma a ser contemplado na futura geração da escala de serviço, como pertencente ao horário de trabalho. É ainda necessário olhar para outras restrições que possam fazer sentido em dado contexto. Em troços longos onde se atingem elevadas velocidades, por exemplo, é comum definir um espaçamento mínimo de segurança entre dois veículos, dando tempo ao de trás para se imobilizar caso aconteça algum imprevisto ao primeiro, evitando acidentes. Em alguns aparelhos de mudança de via também é necessário dar esta margem, para garantir que não há conflitos de passagem.

4.3.1.2. Variantes

De seguida, foi necessário associar as paradas, de forma a informar o programa do trajeto que os veículos percorrerão na realidade. Para isto, criaram-se as variantes de linha, prevendo todos os possíveis trajetos das composições, já incluindo as distâncias entre os diversos pontos de passagem e os tempos de percurso e de paragem. Como referido anteriormente, para a restante linha, entre as estações de Santo Ovídio e do Hospital São João, foram utilizadas as últimas disponíveis, considerando-se o tempo extra de paragem nas paragens de São Bento, Trindade e Pólo Universitário, atualmente em utilização.

As distâncias entre paradas foram medidas no projeto de construção (ver figura 2) e os tempos calculados por aproximação, fazendo uma proporção baseada nos tempos vigentes para as linhas em operação e nas distâncias previstas. Estes valores apenas serão possíveis de confirmar e fazer os ajustes necessários quando a construção estiver concluída e for possível medi-los, fazendo testes com veículos na obra. Assim, obtiveram-se os seguintes tempos de percurso, expostos no Quadro 4.

Quadro 4 – Distâncias e tempos entre paradas

Parada	SOV	AMV2	AMV1	AMV3	MLO1	HSS1	AMV4	AMV7	AMV9	1	2	AMV6	AMV8	5	VLE
Distância (m)	113	18	9	768	991	142	15	145	317	348	17	135	24	50	
Tempo (s)	11	2	1	71	73	13	1	14	30	32	2	13	2	5	

Por outro lado, mesmo efetuando o mesmo trajeto, poderá haver diferenças no tempo necessário para percorrê-lo. O cenário mais habitual ocorre quando o percurso efetuado quando o veículo está em serviço, onde deve ser contemplado o tempo, 25 segundos, destinado à paragem, embarque e desembarque de passageiros. Como será possível deduzir, este cenário traduz-se em oito variantes, pois os veículos podem partir de qualquer um dos cais da estação de origem e chegar a qualquer um dos cais da estação de destino, em ambos os sentidos.

Adicionalmente, é preciso prever as situações em que os veículos circulam vazios, sem serviço (Situação de Deadhead). Aqui, estes não são obrigados a parar nas estações pois não transportam passageiros. Porém, como muitas das vezes isto dá-se no meio da normal operação do metro, também não é possível avançarem sem paragem, efetuam a paragem, não abrindo as portas. Assim, estes são mais dois cenários a considerar na criação das variantes, para cada uma das oito combinações acima apresentadas. Um deles não considerando o tempo de paragem de todo e outro, absorvendo os 25 segundos de paragem no tempo de percurso desde a estação anterior, de modo a, estatisticamente, o software não considerar a paragem, mas ela, de facto, existir.

Há ainda que prever as situações onde os veículos se deslocam em direção ao parque no final do seu bloco de trabalho, ou provenientes do mesmo, ao início do dia (“pull in” e “pull out”, respetivamente). Neste caso, os veículos circulam sempre vazios e não há estações no caminho e, por essa razão, é apenas considerar os vários trajetos possíveis, um para cada cais das estações adjacentes. Por fim, resta abordar a utilização da inversão em Santo Ovídio.

Para todas as restantes possibilidades de percurso, as variantes são iguais às existentes antes da expansão, uma vez que não envolvem nenhum troço novo. Assim, neste caso foram criadas um total de 35 variantes, numeradas de forma análoga às já existentes, que se apresentam de seguida, no Quadro 5.

Quadro 5 – Variantes Criadas

Número	Descrição da variante	Direção	Tipo	Distância (m)	Tempo
71	VLE1 > HSJ1	1	Comercial	11580	00:33:13
72	VLE1 > HSJ2	1	Comercial	11580	00:33:13
73	VLE2 > HSJ1	1	Comercial	11580	00:33:13
74	VLE2 > HSJ2	1	Comercial	11580	00:33:13
81	HSJ1 > VLE1	2	Comercial	11580	00:33:23
82	HSJ2 > VLE1	2	Comercial	11580	00:33:23
83	HSJ1 > VLE2	2	Comercial	11580	00:33:23
84	HSJ2 > VLE2	2	Comercial	11580	00:33:23
v6	VLE1 > HSJ1 VAZIO	1	Vazio	11580	00:24:13
V6	VLE1 > HSJ1 T. Comercial	1	Vazio	11580	00:31:23
v7	VLE1 > HSJ2 VAZIO	1	Vazio	11580	00:24:13
V7	VLE1 > HSJ2 T. Comercial	1	Vazio	11580	00:31:23
v8	VLE2 > HSJ1 VAZIO	1	Vazio	11580	00:24:13
V8	VLE2 > HSJ1 T. Comercial	1	Vazio	11580	00:31:23
v9	VLE2 > HSJ2 VAZIO	1	Vazio	11580	00:24:13
V9	VLE2 > HSJ2 T. Comercial	1	Vazio	11580	00:31:23

Vp	HSJ1 > VLE1 VAZIO	2	Vazio	11580	00:24:08
VP	HSJ1 > VLE1 T. Comercial	2	Vazio	11580	00:31:18
Vq	HSJ2 > VLE1 VAZIO	2	Vazio	11580	00:24:08
VQ	HSJ2 > VLE1 T. Comercial	2	Vazio	11580	00:31:18
Vr	HSJ1 > VLE2 VAZIO	2	Vazio	11580	00:24:08
VR	HSJ1 > VLE2 T. Comercial	2	Vazio	11580	00:31:18
Vs	HSJ2 > VLE2 VAZIO	2	Vazio	11580	00:24:08
VS	HSJ2 > VLE2 T. Comercial	2	Vazio	11580	00:31:18
S6	VLE1 > PVLE	1	Recolha	1043	00:00:04
S7	VLE2 > PVLE	1	Recolha	1044	01:00:04
SE	HSS1 > PVLE	2	Recolha	650	00:03:00
SF	HSS2 > PVLE	2	Recolha	650	00:03:00
IH	PVLE > VLE1	2	Injeção	1043	00:04:00
II	PVLE > VLE2	2	Injeção	1043	01:04:00
I5	PVLE > HSS1	1	Injeção	650	00:03:00
I6	PVLE > HSS2	1	Injeção	650	00:03:00
X3	IVSOV3 > SOV1	1	Vazio	245	00:01:00
XE	SOV2 > IVSOV3 > SOV1	2	Vazio	490	00:04:00
XF	SOV2 > IVSOV3	2	Vazio	245	00:01:00

4.3.1.3. Regras

Para além das restrições físicas relativas à rede, existem ainda as restrições relacionadas com os trabalhadores, estabelecidas no seu contrato de trabalho. Aqui são expressas as regras já referidas no capítulo 3.1.4 desta dissertação.

Estas regras podem ser divididas em dois diferentes tipos: rígidas ou flexíveis. As rígidas devem forçosamente ser cumpridas, independentemente de tudo o resto. São utilizadas em casos muito particulares, pois, caso sejam usadas em excesso, tornam impossível a geração dos horários, ou então originam soluções impossíveis, na prática. As regras flexíveis estabelecem um limite, que caso seja ultrapassado numa solução, é-lhe aplicada uma penalização, desfavorecendo essa solução em detrimento daquelas que cumprirem. Esta “multa” pode ser fixa, tendo sempre o mesmo valor, sem depender do valor do excesso, proporcional à diferença do valor da solução para o limite imposto, ou ainda exponencial, onde esta proporção é agravada.

Estas penalizações serão aplicadas através do custo HASTUS, um valor teórico a partir do qual o software escolhe a melhor solução. Este valor, apesar de pretender traduzir o custo que cada solução tem, o seu valor, isoladamente, na prática não tem significado. As multas podem representar custos reais, associados ao quebrar de alguma regra, por exemplo o pagamento de horas extraordinárias, associado ao quebrar do número de horas previstas no horário de trabalho regular. Por outro lado podem simplesmente traduzir uma preferência do operador, mesmo que este não tenha despesa associada.

A correta definição dos tipos e dos valores de penalização é imprescindível para obter bons resultados, sendo muitas vezes iterativa, já que não é intuitivo achar valores que se adaptem e, dessa forma,

reproduzam a importância dada a cada regra. Em certos casos pode ser aplicada, em simultâneo, uma regra flexível para um limite mais exigente, e uma regra rígida com o mesmo critério, mas para um limite menos exigente. Desta forma consegue-se não só que nenhum valor esteja fora dos parâmetros máximos, mas também que, se possível, nem se aproxime do mesmo. Por exemplo, no caso em estudo, estabelece-se um limite rígido de oito horas e meia para a duração máxima de uma jornada de trabalho, mas também um limite flexível de oito horas que, embora não seja desejável, pode ser ultrapassado.

4.3.2. AGENDAMENTO DE VEÍCULOS

Depois da rede e de todas as restrições estarem parametrizadas, o passo que se segue é criar as viagens para um dia, no horário contratualizado, das 6 horas da manhã, até à 1 hora da manhã do dia seguinte, atendendo aos vários cenários pretendidos. Como simplificação, optou-se por considerar uma frequência constante de veículos, durante todas 19 horas de operação diária, apesar de na realidade, a frequência variar com a época do ano, o dia da semana e o horário, como mostra o Quadro 6.

Quadro 6– Frequências de Verão 2022, Linha D

Horas	Frequência (min)
06:00 - 07:00	10
07:00 – 20:00.	7
20:00 – 01:00	10

Desta forma, cada resultado não será significativo por si só, mas conseguir-se-á de igual modo estabelecer uma comparação entre eles, o mais relevante para o efeito pretendido. Pode-se dizer que a hora de ponta, horário com maior frequência, será a hora onde há mais tendência a haver conflitos da rede, e onde será mais difícil acomodar a circulação na frequência pretendida com as manobras necessárias à mesma. Assim, estendendo este período por todo o dia, estas dificuldades manter-se-ão visíveis, como pretendido.

Mais uma vez, recorrendo ao software HASTUS, criaram-se as viagens, para os vários paradigmas pretendidos. Esta fase corresponde ao *Vehicle Scheduling Problem* descrito na bibliografia. Aqui, é fundamental ter em atenção que não ocorram conflitos de colisão, quando se programa a passagem de vários veículos simultaneamente pelo mesmo ponto, nem de capacidade, quando numa o número de veículos excede a capacidade de determinada estação. Para além disto, estabelece-se um tempo mínimo de 2 minutos para uma inversão de sentido, de modo ao condutor conseguir sair de uma cabine e ir até à do outro lado.

Por último é necessário programar as viagens efetuadas para a recolha ou injeção dos veículos. Esta operação, atualmente, só pode ser efetuado no parque de máquinas e operações de Guifões e em algumas outras estações que acomodam alguns veículos, embora poucos, devido ao risco de vandalização dos veículos. Depois da expansão, construído o parque em Vila D’Este, este problema vai ser mitigado. Aqui, vai ser possível armazenar todos os veículos em circulação na linha D, sendo apenas utilizada a estação do Pólo Universitário para armazenar 2 veículos duplos, como aliás já acontece. Aqui, os últimos veículos de cada dia são armazenados em plena via, para que não haja necessidade de se deslocarem até ao outro extremo da linha, nem até Guifões. Em caso de haver

manobras, por exemplo de inversão e mudança de cais, também se deverá criar as mesmas, para que o software as assuma.

Tudo isto é feito recorrendo ao gráfico de circulação como o que se pode ver na Fig. 4, onde é possível modificar as viagens, de forma interativa e intuitiva, fazendo os ajustes pretendidos para otimizar o sistema.

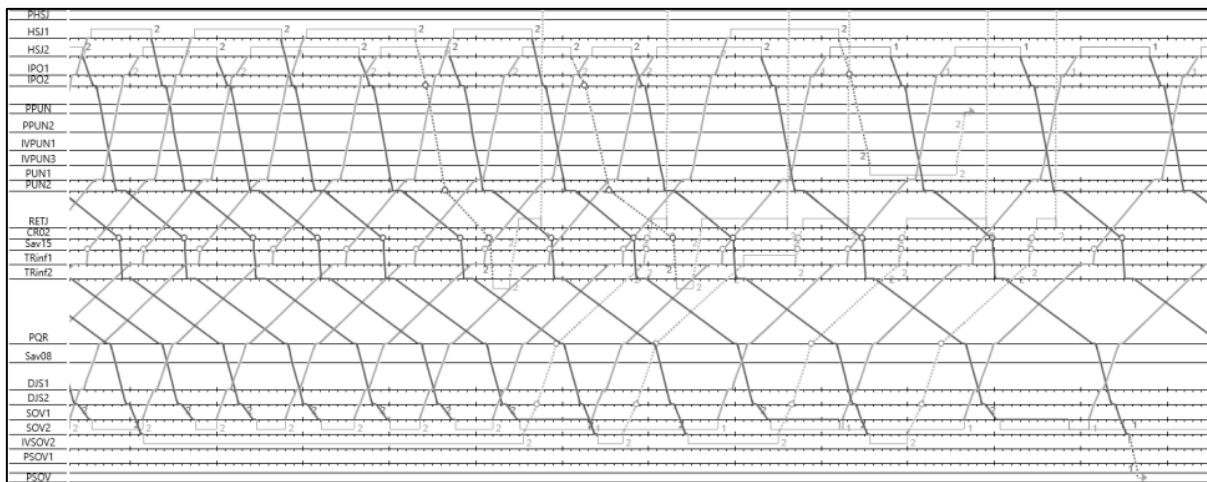


Fig. 4 – Excerto de um gráfico de circulação

Já tendo as viagens definidas, são criados os blocos, associando as viagens entre si, para criar os “blocos de veículo”. Estes representam tudo aquilo que um veículo faz durante um dia, podendo-se, nesta fase, aferir quantos veículos são necessários. A associação das viagens entre si pode ser feita automaticamente pelo software, ou manualmente indicando que ligações se pretendem. Este é muitas vezes o caso, pois, em casos relativamente simples como o da linha D, as próprias viagens já são criadas tendo em conta os blocos idealizados.

Este é um processo que não é frequente na vida de uma operadora de transportes públicos, como é o caso da ViaPorto. A criação de novas viagens de raiz, apenas é necessária em situações como esta, de expansão ou criação de novas linhas. No quotidiano, apenas faz falta fazer alguns ajustes, em função de alterações ou reforços da frequência pontuais pedidos pela Metro do Porto. O horário habitual, mesmo que não o seja automaticamente, ao fim de algum tempo de operação e normais pequenos ajustes, ficará otimizado, como já estão os atuais.

Nos casos em que há uma solicitação de reforço da operação, devido a eventos como jogos de futebol, concertos, festivais ou festas populares é necessário proceder a um ajuste manual, encaixando viagens extra entre as habituais para aquele horário. Há ainda uma dificuldade acrescida pois, por vezes, alguns destes eventos tem uma duração imprevisível. Nestes casos, os veículos extra devem aguardar pela hora fim do evento, de forma a satisfazer a necessidade, o que pode causar problemas de capacidade.

4.3.3. GERAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO

De seguida, já dispondo do horário certo para cada viagem, bem como a programação para cada veículo, é necessário associar cada atividade a um condutor, indispensável à realização da mesma, de forma a obter uma escala de serviço otimizada. Este problema corresponde ao *Crew Scheduling*

Problem, sobre o qual tem sido desenvolvida investigação e tendo novas abordagens ao longo dos anos. No caso em estudo, da empresa ViaPorto, para o resolver, é utilizada a extensão CrewOpt, integrada também no programa HASTUS.

No fundo, o problema que se coloca é encontrar um conjunto ótimo de serviços, de forma a cobrir todas as viagens planeadas. Apesar de complexo, devendo atender a diversas informações como as oportunidades de rendição, os tempos de deslocação de e para as estações, ou o próprio contrato de trabalho, este problema é fundamentalmente formulado como um problema de partição (*set partitioning problem*), onde entre o conjunto de todos os possíveis serviços, deve ser escolhido aquele que cubra cada parcela (porção indivisível da viagem, entre duas oportunidades de rendição consecutivas) exatamente uma vez, com o menor custo. Pode ser expresso como se segue (Dallaire, A. [et al.], 2004)

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i \in I} c_i x_i + \sum_{k \in L} f_k^- s_k^- + \sum_{k \in L} f_k^+ s_k^+ \\
 & \text{s. t.} \sum_{i \in I} a_{ij} x_i = 1, j \in J \\
 & \sum_{i \in I} b_{ik} x_i + s_k^- + s_k^+ = d_k, k \in L \\
 & x_i \in \{0,1\} \\
 & s_k^- \geq 0, k \in L \\
 & s_k^+ \geq 0, k \in L
 \end{aligned}$$

(1)

Onde:

I é o conjunto de todos os serviços possíveis;

J é o conjunto de todas as tarefas de condução;

L é o conjunto de restrições adicionais;

c_i é o custo do serviço $i \in I$;

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o serviço } i \text{ cobre a tarefa de condução } j, i \in I, j \in J \\ 0 & \text{em todos os outros casos;} \end{cases}$

b_{ik} é o coeficiente da variável i na restrição $k \in L$;

f_k^- é o custo da variável de folga da restrição $k \in L$;

f_k^+ é o custo da variável de sobra da restrição $k \in L$;

s_k^- é a variável de folga da restrição $k \in L$;

s_k^+ é a variável de sobra da restrição $k \in L$;

d_k é o valor do lado da restrição $k \in L$;

$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se o serviço } i \text{ é selecionado na solução, } i \in I \\ 0 & \text{em todos os outros casos.} \end{cases}$

Porém, devido à grande complexidade do problema, esta formulação gera um número incomputavelmente alto de serviços. Assim, o programa cria, de forma heurística, uma série de subconjuntos I' , muito mais pequenos que o original I , simplificando bastante o problema.

Desta forma, na perspectiva do planeador que pretende otimizar as escalas de serviço basta utilizar a funcionalidade CrewOpt, já tendo introduzido as restrições, bem como as viagens e os blocos de veículo. Apesar das simplificações e dependendo da dimensão do sistema, o problema demora horas a ser resolvido, apresentando por fim os serviços otimizados como se pode ver na figura 5.

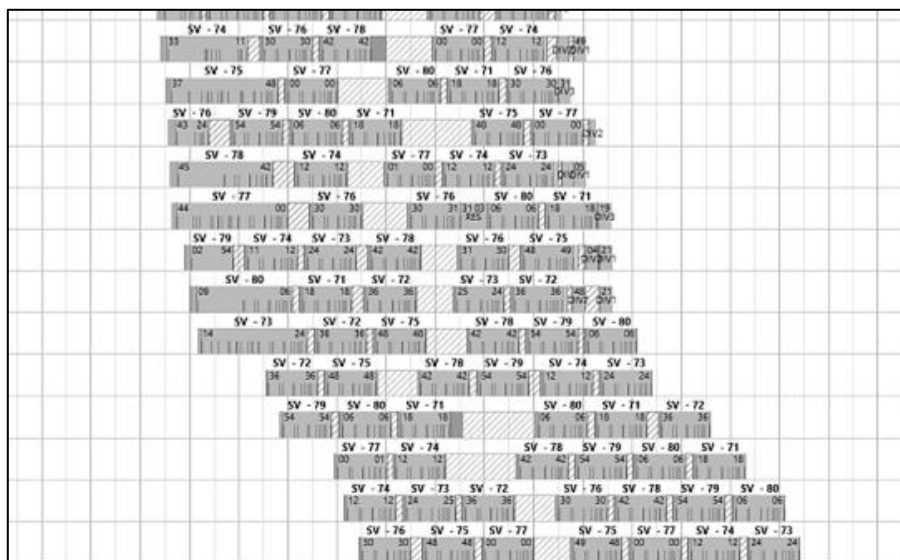


Fig. 5 – Excerto de uma escala de serviço

À partida, esta escala de serviço já contempla todas as restrições dispostas anteriormente, porém é ainda feita uma revisão manual da mesma, procedendo a alguns ajustes de forma a resolver alguns problemas pontuais ou atender a algumas preferências do operador, não introduzidas no software.

Em suma, é calculado o custo total de cada solução, tendo por base principalmente no número de condutores de que esta necessita, mas também o custo relacionado com as penalizações associadas às restrições flexíveis (ver o capítulo 4.2.1.3.). Este custo calculado pelo HASTUS é um custo teórico, adimensional, que individualmente não tem significado. Deve ser utilizado como comparação entre cenários pois, caso os parâmetros estejam bem definidos, este parâmetro consegue refletir os vários fatores que se pretendem otimizar.

4.3.4. ATRIBUIÇÃO DAS ESCALAS DE SERVIÇO

As escalas geradas no ponto anterior apenas traduzem o resultado de uma otimização diária, não atendendo à gestão do calendário de cada condutor. Aliás, este resultado consiste apenas numa série numerada de serviços, não lhes estando associado nenhum condutor específico. Ora, desta forma, é necessário passar por uma fase seguinte, onde cada serviço é atribuído a um condutor específico, tendo em conta as restrições de trabalho que envolvam um intervalo de tempo superior a um dia, bem como preferências ou disponibilidades particulares de certos condutores. Na literatura internacional este problema é conhecido por *Crew Rostering Problem*.

Nesta fase são atendidas as folgas, os dias de férias, algumas condicionantes da disponibilidade pessoais e justificadas de alguns motoristas, bem como é assegurado o respeito pelos intervalos mínimos entre jornadas de trabalho. Para além disto, procura-se que haja uma rotatividade dos

diversos condutores pelos diferentes serviços, e, se possível, por várias linhas da rede. Assim, consegue-se um equilíbrio entre as escalas mais e menos exigentes, assim como não há uma habituação a somente um percurso, o que seria negativo.

Os condutores, como expresso no seu contrato coletivo de trabalho, têm direito a dois dias semanais de folga. Atendendo a isso, é estabelecida uma rotação, onde cada trabalhador trabalha 6 dias consecutivamente, usufruindo dos 2 dias de descanso a seguir, obtendo-se uma rotação entre todos os dias da semana, como se mostra na Fig. 6. A cada sete semanas, é efetuado um ajuste dando um dia de folga “extra”, acertando a contagem, de modo a respeitar as obrigações contratuais.

Domingo	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira	Sábado
5	6	Descanso	Descanso	1	2	3
4	5	6	Descanso	Descanso	1	2

Fig. 6– Esquema da rotação de serviço

Note-se ainda que muitas vezes surgem solicitações de condutores para trocas de serviço. Isto leva a frequentes alterações nesta dinâmica, sendo preciso bastante trabalho para garantir que tudo bate certo.

Por outro lado, como por vezes surgem imprevistos e ausências à última da hora, é necessário haver permanentemente alguns condutores de reserva no centro de operações. Isto está contemplado no horário de cada um, constando também na respetiva escala de serviço.

Outro fator para que se deve olhar nesta fase é a localidade onde cada condutor reside, tentando aproximar o local de entrada e saída de serviço da sua habitação. Isto é bastante benéfico para os mesmos, uma vez que gastam menos tempo, e até dinheiro, em viagens por sua conta, diariamente. Esta consideração é feita dividindo os condutores em grupos, conforme a sua habitação e associando-lhes uma “base” que lhes seja conveniente. Ao dia de hoje, existem dois grupos, um associado à Póvoa de Varzim – extremo da linha mais longa da rede, a uma grande distância das zonas mais centrais – e um outro associado ao resto da rede. No entanto, esta divisão será sempre um pouco subjetiva, não havendo uma solução ideal. Se por um lado é benéfico pela poupança de deslocações fora do horário de trabalho, por outro reduz a possibilidade de rotação interna, ficando os condutores de um grupo mais restritos aos serviços que incluam a zona que é associada a esse mesmo grupo. Por vezes, também se torna impossível respeitar os grupos, pelo que os mesmos são flexíveis, permitindo, por exemplo condutores da Póvoa de Varzim entrar ocasionalmente ao serviço noutra qualquer estação da rede, bem como o seu contrário.

4.4. ANÁLISE GERAL

Todo o processo de escalonamento de condutores para o Metro do Porto, na ViaPorto segue o processo já explicado. Ao longo do tempo, foram sendo realizadas experiências e testes que vão aperfeiçoando todo o sistema a pouco e pouco, assim como os processos são adaptados às alterações que a rede sofre e às solicitações que a própria realidade exige.

Podemos assim dizer que este, tal como a realidade, é um sistema dinâmico e acompanha muitas vezes as dinâmicas sociais que o envolvem e que será sempre necessário estar aberto à mudança, não sendo possível em muitos campos, uma otimização perfeita. O exemplo mais claro é, talvez, a dependência entre as frequências a ser asseguradas e a dinâmica económica e social da cidade e da área metropolitana. Mais ainda, sendo o Porto uma cidade onde o turismo assume uma grande, e cada vez maior, preponderância, esta atividade também se faz sentir na procura do metro, principalmente na época de verão. Assim, as frequências do metro devem acompanhar esta solicitação, cabendo aos planeadores adaptar o escalonamento a esta solicitação.

Outro exemplo recente é a pandemia de COVID-19 que se abateu sobre o mundo. Os confinamentos a que esta levou trouxeram uma drástica redução da procura e, como tal, a um completo reformular dos horários e da escala de serviço. Porém, esta não foi a única consequência que se fez sentir neste campo. Os condutores, como humanos que são, foram diretamente afetados e muitos deles foram inclusivamente infetados ou ficaram em isolamento profilático, até porque nunca pararam e ficaram expostos ao risco, mesmo nos períodos mais dramáticos. Isto levou a um grande número de baixas e ausências imprevistas, pelo que foi necessário estar preparado para conseguir arranjar alternativas. Outro pormenor onde também é visível esta influência, e que à primeira vista poderia passar despercebido é o da capacidade dos carros de transporte dos condutores desde o ponto de entrada ao serviço até à estação onde começam a condução. Esta, como medida de segurança e prevenção contra o contágio foi reduzida, o que levou a pequenas alterações na escala de serviço, pois passou a não ser vantajoso esperar por haver 4 ou 5 condutores para fazer a viagem.

O próprio contrato de trabalho não é algo fixo. Apesar da mais recente atualização, em 2022, ter vindo acompanhada de uma expectativa de paz social até ao fim da concessão, em 2024, até aqui este foi sendo alterado, fruto de negociações com os sindicatos e da luta e reivindicação dos trabalhadores. As próprias greves, instrumento de luta por melhores condições, foram algo que afetou diretamente a operação nos últimos anos, devendo, também por isso, ser evitadas pela negociação, respondendo aos anseios dos condutores. Toda esta dinâmica social tem consequências diretas ou indiretas no processo de escalonamento, devendo este acompanhá-las.

Fruto de toda estas melhorias e adaptações, este processo fica bastante otimizado, para além do processo matemático e computacional do computador, de uma forma empírica, dada a experiência de quem o faz habitualmente. Com isto, em junho de 2022, para um dia útil de operação regular, necessita-se de 10 veículos, bem como de 30 condutores somente dedicados à linha D.

No entanto, como o processo é feito sequencialmente, estes valores poderão apresentar algumas diferenças em relação à solução ótima teórica. A resolução integrada e automatizada das três fases do problema talvez trouxesse alguma poupança. Este ainda é um campo onde está a ser desenvolvida pesquisa e investigação, pelo que é provável que, no futuro, os agora recentes desenvolvimentos sejam aplicados e se a solução ótima. Esta automatização poderia, por outro lado, resolver o problema de uma forma ainda mais bem otimizada, reduzindo o inevitável erro humano, para além de diminuir a dependência do escalonamento da experiência de quem o faz.

Porém, será sempre de muito elevada dificuldade reproduzir fielmente no software todas as restrições e condicionantes, laborais e da rede, muitas delas até subjetivas que dependem da preferência de cada um. Atualmente, algumas destas condições acabam por ser refletidas manualmente na escala de serviço. Desta forma, apesar de o software ser uma ferramenta muito útil, indispensável neste campo, este provavelmente nunca funcionará por si só.

Conclui-se que, apesar de haver sempre espaço para melhoria, o processo de escalonamento funciona relativamente bem. As possíveis perdas que possam ocorrer graças à otimização não ser perfeita, serão muito mais prováveis em escalas pontuais, devido, por exemplo, a eventos. Nas escalas “permanentes”, a médio prazo, as eventuais falhas são mitigadas e tornam-se desprezáveis. Nas escalas pontuais, devido a eventos ou a outra perturbação da rede, estas imperfeições perdem relevância pois são específicas para poucos dias, logo não se repetirão muitas vezes, não se multiplicando.

5

SIMULAÇÃO DOS DIFERENTES
CENÁRIOS

5.1. APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS

Depois de finalizada a modelação de todo o sistema no HASTUS, foi possível criar vários cenários de operação para a linha D, já incluindo a nova extensão. Estes cenários procuraram corresponder a possíveis cenários reais, de modo a estar preparado para diversas solicitações quando a nova parte da linha já estiver operacional. A escolha de um destes cenários dependerá sempre da procura, devendo-se agir em resposta às necessidades dos passageiros. No entanto, a simulação prévia dos cenários permite saber, *a priori*, quais serão mais vantajosos a nível de eficiência

Com este objetivo, criaram-se dois cenários diferentes, testando cada um destes para vários números de passagens horárias diferentes e, consequentemente, para frequências diferentes, como é visível no Quadro 7. O primeiro corresponde a todos os veículos percorrerem toda a linha, entre as estações de Vila D’Este e do Hospital São João. No caso do segundo cenário, há um corte na estação de Santo Ovídio, ficando por aqui metade das composições. Assim, a frequência no novo troço da linha, entre Santo Ovídio e Vila D’Este, será metade da frequência da restante linha. As frequências foram escolhidas com base na que circula atualmente, 10 passagens por hora em cada sentido, sabendo que a expansão necessariamente trará consigo um aumento da procura e, portanto, será provável haver a necessidade de lhe responder com um aumento de frequência.

Quadro 7 – Nº Horário de Passagens (passagens por hora e por sentido, phs) e frequência para os novos cenários

Cenário	phs (HSJ – SOV)	phs (SOV – VLE)	Frequência (HSJ – SOV)	Frequência (SOV – VLE)
Todos os veículos percorrem toda a linha	12	12	5:00	5:00
	14	14	4:17	4:17
	16	16	3:45	3:45
Metade dos veículos segue somente até Santo Ovídio	10	5	6:00	12:00
	12	6	5:00	10:00
	14	7	4:17	8:34
	16	8	3:45	7:30

5.2. PRIMEIRO CENÁRIO

Como já foi referido, neste primeiro cenário, todos os veículos fazem o percurso completo da linha D. Dentro deste cenário, foram estudados três regimes de frequência diferentes, com 12, 14 e 16 passagens por hora e sentido. De momento, até Santo Ovídio há 10 passagens horárias, porém com o aumento previsto da procura da linha, considerou-se que manter esta frequência não será suficiente, pelo que se deveria aumentar para uma das estudadas. Para além disto, a nível operacional, excetuando situações de recolha ou injeção de veículos, este caso seria bastante semelhante ao que acontece atualmente, apenas estendida aos novos 3 quilómetros de via.

Neste caso, nas estações terminais da linha, os cais seriam utilizados alternadamente, como se pretende mostrar na Fig. 7. Caso contrário, se apenas fosse utilizado um deles, não seria possível existirem os dois minutos entre a chegada e a partida, necessários à troca de cabine do condutor.

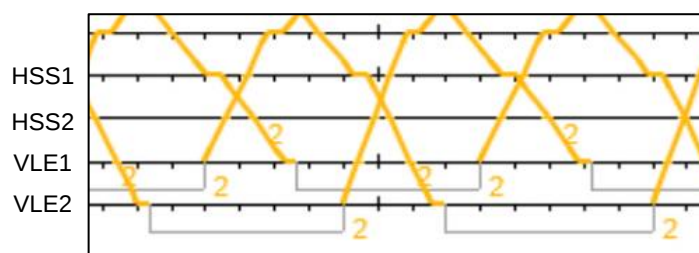


Fig. 7 – Chegadas alternadas a VLE1 e VLE2

Note-se ainda que com esta alternância há que ter em atenção os potenciais conflitos de colisão à saída das estações terminais. Em Vila D’Este, as composições chegam pela via 2 e caso o seu destino seja o cais 1, utilizam as agulhas 8 e 15 (Fig. 8(1)). Ora, deve ser evitado que no momento em que isto sucede esteja outro veículo a sair do cais um, caso contrário haverá uma colisão. Mais condicionante será o caso contrário, onde um veículo se destina ao cais 2 (Fig. 8(2)). Como vem pela via 2, destinada ao sentido HSJ – VLE, na chegada não haverá problema. Porém, quando parte segue em contravia até ao AMV 6 e só aí é possível efetuar a mudança para a linha “certa”. Este percurso em contravia, suscetível a haver conflitos, tem uma extensão de mais de 200 metros, restringindo gravemente a circulação.

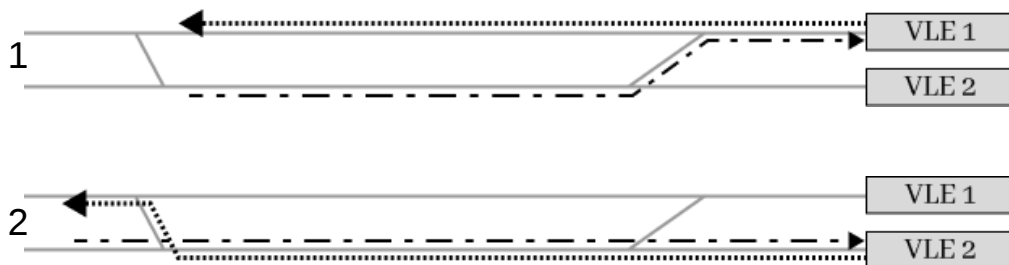


Fig. 8 – Esquema dos Potenciais conflitos em VLE

Quanto à injeção e recolha de veículos, estas são particularmente beneficiadas com a extensão. Com ela, os veículos poderão ser parquoados durante a noite no novo parque de máquinas e operações, entre as estações de Vila D’Este e do Hospital Santos Silva. Desta forma a necessidade de viagens sem serviço de e para Guifões, passa a ser esporádica. Dois dos veículos continuarão a ser estacionados na

estação do Pólo Universitário, como já acontecia. Uma vez que estes ficarão imobilizados em plena via, serão os últimos veículos do dia. Após concluírem a sua última viagem, no Hospital São João, têm uma viagem sem serviço até ao Pólo Universitário, um deles fazendo-a totalmente em contravia, já que nesse horário já não haverá mais serviço. Terá ainda que haver o cuidado de estes veículos não serem os mesmos todos os dias, pois aqui não há instalações de limpeza, aspiração ou manutenção.

Todos os restantes ficarão no PMO, e terão que lá chegar, provenientes de ambos os extremos da linha. Desde Vila D'Este a viagem é curta, com 1043 metros de extensão, sendo também afetada pelos condicionantes representados na Fig. 8. Por outro lado, desde o Hospital São João, as composições terão de percorrer quase toda a extensão da linha até ao parque. Estas viagens representam a maior perda de eficiência do sistema, pois cada uma representa mais de 10 quilómetros e meia hora de viagem, sem transporte de passageiros e, por isso, sem rentabilidade prática.

Para este cenário, percorrendo todo o processo exposto no capítulo 4, para cada uma das 3 frequências propostas, chegou-se aos resultados, visíveis no Quadro 8

Percebe-se que, racionalmente, quanto maior a frequência, serão necessários mais veículos e mais serviços. Conclui-se que, no fundo, por cada 2 veículos horários acrescentados serão necessárias 2 composições duplas a mais. Quanto aos condutores necessários em cada dia, o acréscimo será maior, entre 6 e 7 condutores por cada duas passagens horárias a mais.

Quadro 8 – Resultados para o primeiro cenário

Passagens / Hora / Sentido	Composições Necessárias	Serviços Gerados
12	16	48
14	18	55
16	20	61

5.3. SEGUNDO CENÁRIO

Como já foi referido, o segundo cenário analisado nesta dissertação corresponde àquele onde metade dos veículos invertem a sua marcha na estação de Santo Ovídio, não prosseguindo até Vila D'Este. Aqui, apesar do expectável aumento da procura, considerou-se também a situação em que é mantida a frequência atual – 10 passagens por hora e sentido - até Santo Ovídio, continuando metade destas daí para a frente. Para além de, ao contrário do primeiro cenário, haver alterações mais significativas a nível operacional, a introdução de veículos vazios a partir de Santo Ovídio poderá deixar espaço para que passageiros entrem em estações mais adiantadas, mesmo que as provenientes de Vila D'Este se encontrem lotadas. Desta forma, foram testadas alternativas com 10, 12, 14 e 16 passagens horárias no troço Hospital São João – Santo Ovídio, e, em consequência, 5, 6, 7 ou 8 no troço correspondente ao alargamento.

Com este cenário, haverá a necessidade de inverter a marcha de alguns veículos na estação de Santo Ovídio, o que não pode ser feito na via de circulação. Para isso é usada a nova inversão, IVSOV3, e as variantes X3, XE e XF, que lhe estão associadas. Garante-se assim que é possível o veículo estar pelo menos 2 minutos parado, de forma a ser possível inverter a sua marcha, com o mínimo de perturbação da restante circulação, como é possível observar na Fig. 9

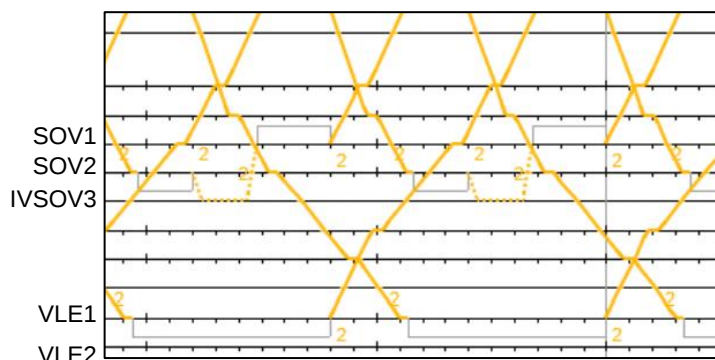


Fig. 9 – Inversões no segundo cenário

Em Vila D'Este, nas frequências mais baixas, como é o caso da apresentada apenas é utilizado um dos cais, visto que, como a frequência é baixa, é possível o veículo arrancar do cais 1 e percorrer o trajeto até ao final da zona de conflito, sem que o próximo veículo lá chegue, anulando o potencial de colisão. Em frequências mais altas é feito o mesmo que no primeiro cenário, porém como nesta estação, a frequência máxima será de oito passagens horárias, correspondentes a um veículo a cada 7 minutos e meio, isto não causará problemas na operação. No outro extremo da linha, no Hospital São João, não haverá alterações em relação ao cenário anterior, uma vez que a frequência aí se mantém igual.

Por outro lado, na estação de Santo Ovídio, a situação complica-se. Se no primeiro cenário esta era meramente uma estação de passagem, neste cenário é um local onde têm de ser feitas inversões. Estas, apesar da existência de um local destinado a fazê-las, continuam a merecer a atenção dos planeadores. Para entrar em IVSOV3, os veículos provenientes de norte, pela via 2, para entrarem na inversão forçosamente passam pela via 1, como se mostra na Fig. 10. Este, apesar de ser um percurso em contravia com apenas 9 metros, condiciona toda a geração do horário de viagens.

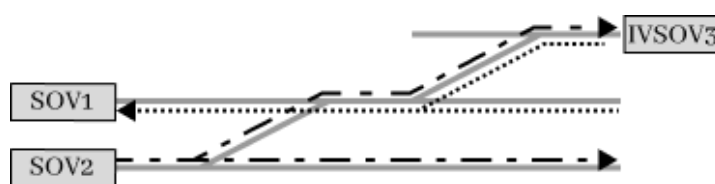


Fig. 10 – Esquema dos potenciais conflitos em SOV

No que diz respeito à injeção e recolha de composições, a única diferença em relação ao cenário anterior será que haverá alguns veículos a ser injetados para a estação de Santo Ovídio e também recolhidos para a mesma. Assim, apenas haverá que ter em atenção as condicionantes já conhecidas.

Por fim, da simulação deste cenário resultaram os resultados expostos no Quadro 9. As conclusões neste nível não são diferentes das anteriores. A tendência de aumento conjunto da frequência, dos veículos e dos serviços gerados mantém-se. Os valores de subida constante no número de composições são semelhantes. Para os serviços gerados, os valores de aumento também não têm significativa alteração, mantendo-se alguma irregularidade, sempre em torno dos mesmos valores.

Quadro 9 – Resultados para o segundo cenário

Passagens / Hora / Sentido	Composições Necessárias	Serviços Gerados
5 + 5	13	39
6 + 6	15	45
7 + 7	17	53
8 + 8	19	60

5.4. CENÁRIO DE VALIDAÇÃO

Por fim, de forma a ter uma análise ainda mais próxima da realidade, procedeu-se também ao teste numa situação mais realista, variando a frequência ao longo do dia como é mostrado no Quadro 10, adotando para a hora de ponta a frequência de 6 + 6 passagens horárias.

Quadro 10 – Frequências Variáveis

Horário	phs (HSJ – SOV)	phs (SOV – VLE)
06:00 – 07:00	6	3
07:00 – 19:00	12	6
19:00 – 20:00	10	5
20:00 – 21:00	5	2
21:00 – 01:00	4	2

Desta forma foi possível avaliar as principais diferenças em relação à simplificação efetuada. Salienta-se alguns constrangimentos relacionados com a injeção e recolha dos veículos, por algumas destas manobras serem realizadas ainda com intenso serviço de passageiros a decorrer. A nível de valores, concluiu-se que serão necessários um total de 15 composições, os mesmos que a frequência constante, e 36 serviços, com uma redução significativa. Isto justifica-se por à hora de ponta, das 7:00 às 19:00, todos os veículos serem necessários, embora alguns deles estejam menos tempo em circulação. De forma contrária, a redução dos condutores necessários justifica-se por, fora de hora de ponta a redução da frequência ser bastante acentuada. Assim, nestes horários são precisos muito menos condutores, reduzido a quantidade total.

5.5. ANÁLISE COMPARATIVA

Como já foi referido, estes cenários, até por não passarem de simplificações da realidade, devem ser estudados através de uma análise comparativa entre ambos, pois analisados isoladamente pouco representam. A forma mais direta de o fazer, será comparando os resultados estatísticos obtidos em relação aos veículos e condutores necessários, como é feito na figura 11.

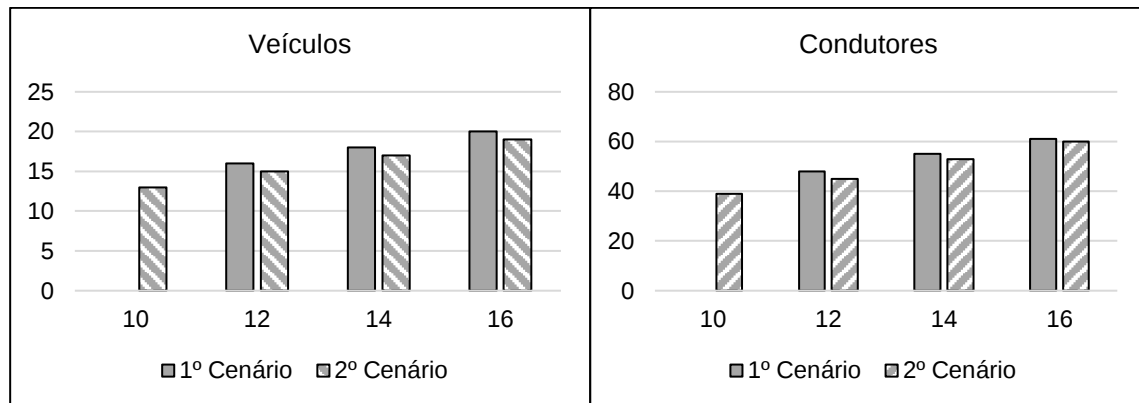


Fig.11 – Gráficos comparativos do número de veículos e de condutores

Porém, daqui não é possível tirar muito mais conclusões do que as previamente extraídas, da análise individual. Ainda assim, é possível visualizar que, como se esperava, há alguma poupança do segundo cenário face ao primeiro. No lado dos veículos, a diferença mantém-se constante, sendo independente da frequência da circulação. Da mesma forma, do lado dos condutores constata-se que a diferença praticamente se mantém.

Com mais interesse, será a análise de dados menos diretos, como o tempo em serviço e sem serviço, o custo teórico calculado pelo HASTUS, como se mostra no quadro 11 e na figura 11, que se seguem. De notar que o “tempo em serviço” considerado corresponde apenas ao tempo que os veículos estão em movimento, com passageiros, sem ter em consideração os tempos destinados a carregar e descarregar passageiros. Na prática, estes serão proporcionais às paragens e, logo, às viagens efetuadas e ao tempo em serviço. Assim, as diferenças notadas advirão do tempo realmente sem serviço, seja do tempo em espera, ou das viagens em *Deadhead*. Quanto ao custo HASTUS, como explicado no capítulo 4.2.3, este é apenas um custo teórico, adimensional, mas permite dar uma ideia da relação de custos entre as diferentes soluções.

Quadro 11 – Dados Estatísticos das Soluções

phs	Tempo em serviço (horas)	Tempo sem serviço (horas)	Custo HASTUS	Horas pagas
5+5	139:55:00	118:38:08	18386	306:26:00
6+6	168:05:00	130:32:33	21207	353:27:00
7+7	195:52:00	142:34:22	24541	409:21:00
8+8	223:18:00	154:06:50	28051	467:34:00
12	184:32:00	134:14:00	22470	374:31:00
14	215:09:00	143:17:06	25830	430:31:00
16	245:46:45	151:05:30	29171	486:11:00

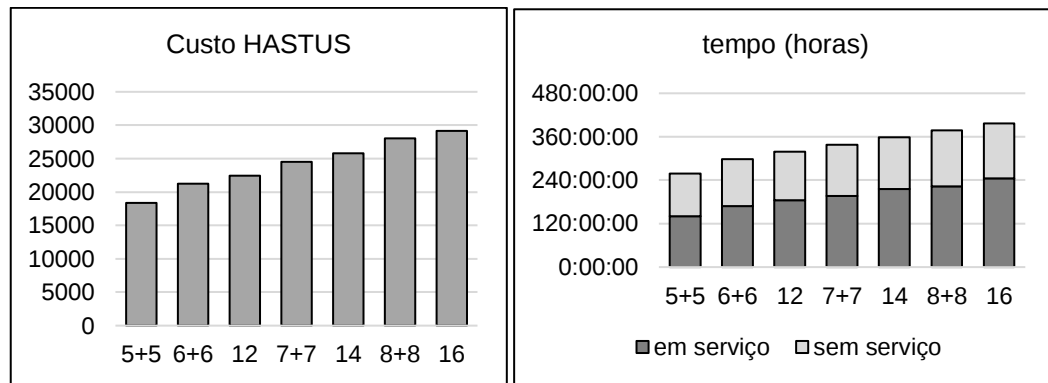


Fig. 12 – Gráficos comparativos do custo e do tempo

Da simples análise destes dados podem ser extraídas várias conclusões. Primeiramente, pode-se concluir que o tempo sem serviço, um dos mais importantes indicadores a minimizar, não tem uma correlação forte com a frequência escolhida, ao contrário do tempo em serviço. Conclui-se também que, a nível operacional, será mais dispendioso ter uma frequência mais alta, embora fazendo apenas parte do percurso (segundo cenário), do que ter menos veículos por hora, mas todos eles seguindo até ao fim de linha. Quanto ao custo HASTUS, percebe-se que está intimamente ligado ao número de horas pagas aos trabalhadores. Apesar de também ser influenciado por outras variáveis, como o trabalho noturno, ou as penalizações relacionadas com a quebras de regras flexíveis, é sem dúvida o número de serviços escalados e consequente número de horas pagas.

Concluindo, mais do que olhar para os resultados estatísticos, é importante olhar para as contingências práticas de cada cenário, nos seus limites, e adaptá-lo às solicitações que forem solicitadas. Neste caso concreto, percebe-se que em ambos os cenários há restrições e que, por norma, ao aumentar a frequência o congestionamento das vias aumenta, e, portanto, também aumenta a dificuldade no escalonamento, potencialmente trazendo perdas de eficiência. Desta forma, sendo os dois cenários possíveis e perfeitamente viáveis a nível da operação, só com a informação sobre a procura será possível afirmar, com toda a certeza, qual o melhor dos cenários.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES DO ESTUDO

Como seria esperado, este é um estudo complexo, envolvendo uma vasta gama de fatores que fogem do possível controlo. Será sempre necessário ir adaptando a escala vigente, às vezes até diariamente, de forma a adaptar-se às solicitações que o mundo que rodeia o sistema de metropolitano exige.

De um ponto de vista mais genérico, concluiu-se que a geração de escalas de serviço, tema que motivou largos estudos ao longo do tempo, até aos dias de hoje é uma área ainda em desenvolvimento tecnológico. Este progresso deve, não só pretender otimizar cada vez mais, de um ponto de vista matemático os horários e as escalas de serviço, mas também atender a um ponto de vista mais subjetivo. O que é melhor para um planeador, pode não o ser para outro, o mesmo se aplicando às empresas, ou mesmo aos condutores. Muitos dos sistemas utilizados atualmente, incluindo o HASTUS, pretendem efetuar uma otimização envolvendo múltiplos fatores o que é, sem dúvida, positivo. Porém, esta subjetividade, pela sua natureza, será impossível de reproduzir na perfeição através de um algoritmo, cabendo muitas vezes ao bom senso e à sensibilidade de cada um.

Os paradigmas criados pretenderam reproduzir possíveis cenários de operação real e, embora simplificados, ajudarem a perceber a sua viabilidade. Não foi tirada nenhuma conclusão absoluta, visto que isso só sucederia caso uma das soluções fosse, por algum motivo, claramente inviável do ponto de vista técnico. Desta forma, percebeu-se que ambos os cenários poderão ser colocados em prática, embora cada um tenha as condicionantes analisadas previamente.

A nível mais prático, considera-se que, de modo a evitar a existência de viagens sem serviço, cuja existência não traz nenhum valor acrescentado, apenas existem por questões operacionais, estas algumas destas poderiam ser substituídas por viagens comerciais. Por exemplo, as composições que se deslocam para o estacionamento, vazias, a meio da operação, poderiam circular comercialmente até à última estação antes do parque. Assim, não seriam criadas viagens a mais, não seriam necessários mais motoristas e haveria um melhor serviço público, como é objetivo do Metro do Porto. No entanto, para a empresa concessionária, a ViaPorto, isto não traz nenhuma vantagem, pelo que teria de haver uma negociação para obter algum tipo de recompensa por abrir estas viagens aos passageiros.

Apesar de, de facto, só quando a extensão da linha estiver em operação, previsivelmente em 2024, ser possível ter a certeza de qual o cenário mais adequado, até lá é possível estabelecer e prever quais funcionarão melhor. Na ótica dos passageiros, logicamente, as soluções são quanto melhores quanto mais frequência houver. Assim será menor o tempo de espera e menor a taxa de ocupação dos veículos, o que aumenta o conforto da viagem. Para os utilizadores provenientes das estações atualmente existentes, nomeadamente as estações do troço entre Santo Ovídio e o Jardim do Morro, as soluções com corte de metade do serviço em Vila d'Este são preferíveis, pois não são afetadas pela

diminuição da frequência, e em casos de saturação da oferta, onde os veículos provenientes das novas estações já se encontrem cheios (situação que se pretende evitar, mas que em situações extremas poderá suceder), será possível usufruir da outra metade da oferta, proveniente de Santo Ovídio. Por outro lado, para os utilizadores das novas estações a solução com serviço completo será bastante melhor, uma vez que usufruem do dobro da oferta, sendo reduzido a metade o tempo máximo possível de espera.

Por outro lado, para o Metro do Porto, os cenários com mais veículos por hora não serão necessariamente os melhores. A empresa terá de encontrar um equilíbrio entre a qualidade do serviço e a satisfação dos passageiros e a eficiência do sistema. Por isso, não será do seu interesse ter muitas viagens, se os veículos circularem maioritariamente vazios, uma vez que cada viagem tem um custo associado.

Neste sentido, de forma a extrair conclusões com mais algum realismo, procedeu-se a uma análise das expectativas de procura para a extensão da linha D. Para isto foi utilizado o estudo de procura realizado aquando da elaboração da Análise Custo-Benefício do projeto de extensão da linha amarela (TiS, 2017). Aqui prevê-se que a procura captada pela nova expansão seja de cerca de 13350 passageiros diários. Também se antevê que a procura anual da linha amarela seja aumentada em cerca de 3 milhões de passageiros, correspondendo a um incremento de cerca de 5%.

Porém, mais relevante para o estudo em questão será de maior relevância a distribuição destes passageiros. Para isso é útil o gráfico da figura 12. Aqui nota-se que, apesar da elevada densidade dos locais onde a nova extensão passará, a carga na parte central da linha D continua a ser muito superior à dos seus extremos.

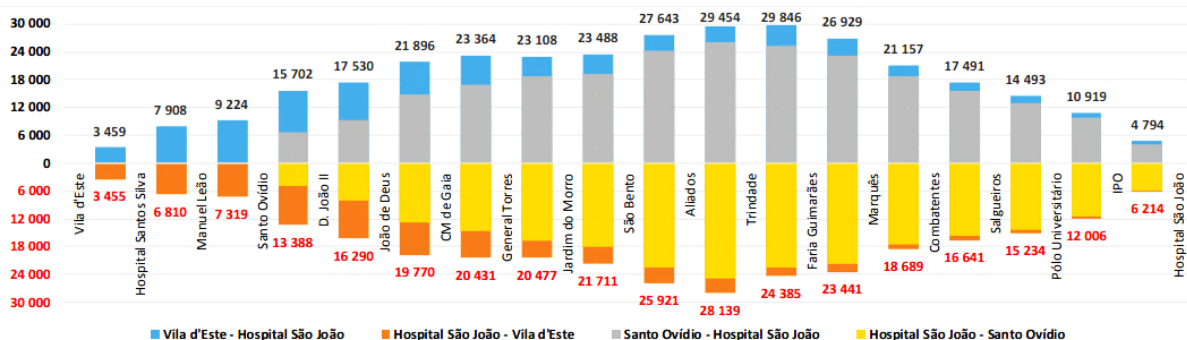


Fig. 13- Diagrama de carga diária (valores em ano cruzeiro útil médio)

Assim, na ótica da empresa Metro do Porto, pode fazer mais sentido optar por um cenário de operação semelhante ao apresentado no segundo cenário desta dissertação, com um corte de serviço em Vila d'Este.

Por sua vez, o trabalho da ViaPorto seguirá as solicitações da Metro do Porto no que toca a frequências e horários. Desta forma a sua única preocupação no que diz respeito a esta escolha de cenários deve ser o assegurar da exequibilidade e da eficiência dos mesmos. Todos os casos estudados são viáveis e têm uma eficiência perfeitamente aceitável. Decerto, com o diminuir das viagens haverá uma maior flexibilidade logística e maior tempo para efetuar as manobras necessárias, porém isto não deverá condicionar a escolha, uma vez que através de um planeamento adequado, tudo terá uma solução adequada.

6.2. SEGUIMENTO DA INVESTIGAÇÃO

Como já se tentou demonstrar anteriormente será sempre possível continuar esta investigação, quer no panorama geral da investigação sobre escalas de serviço em transportes, quer no caso prático da extensão da linha D.

Por um lado, dever-se-á prosseguir o estudo na integração dos 3 subproblemas existentes. Por outro deve-se prosseguir o estudo, aproximando as simulações da realidade ou ainda criando cenários com diferentes alternativas. Um deles poderá ser, por exemplo, a inclusão de um *joker* na linha, como já atualmente acontece.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ball, Michael; Bodin, Lawrence; Dial, Robert - A Matching Based Heuristic for Scheduling Mass Transit Crews and Vehicles. *Transportation Science*. Vol. 17. (1983). p. 4-31. ISSN:
- Barraqueiro SGPS, S.A. - Relatório e Contas. 2021. ISBN/ISSN:
- Dallaire, Alain; Fleurent, Charles; Rousseau, Jean-Marc - Dynamic constraint generation in HASTUS-CrewOpt, a column generation approach for transit crew scheduling. (2004). ISSN:
- Desrochers, Martin; Soumis, François - A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem. *Transportation Science*. Vol. 23. n.º 1 (1989). p. 1-13. Disponível em WWW: <<https://dx.doi.org/10.1287/trsc.23.1.1>>. ISSN: 0041-1655
- Freling, Richard; Wagelmans, Albert; Paixão, José - An Overview of Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. 1999. ISBN: 978-3-540-65775-0
- Ibarra-Rojas, O. J.; Delgado, F.; Giesen, R.; Muñoz, J. C. - Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 77. (2015). p. 38-75. Disponível em WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515000454>>. ISSN: 0191-2615
- Liping, Zhao - A heuristic method for analyzing driver scheduling problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*. Vol. 36. n.º 3 (2006). p. 521-531. Disponível em WWW: <<https://dx.doi.org/10.1109/tsmca.2005.853497>>. ISSN: 1083-4427
- Metro do Porto, S.A. - Relatório e Contas 2021. 2022. ISBN/ISSN:
- TiS - Análises Custo-Benefício - Extensão do Metro do Porto Santo Ovídio/Vila D'Este - Estudo de Procura. Metro do Porto, 2017. ISBN/ISSN:
- Tóth, Attila; Krész, Miklós - An efficient solution approach for real-world driver scheduling problems in urban bus transportation. *Central European Journal of Operations Research*. Vol. 21. n.º S1 (2013). p. 75-94. Disponível em WWW: <<https://dx.doi.org/10.1007/s10100-012-0274-3>>. ISSN: 1435-246X
- Wren, Anthony - Heuristics Ancient and Modern: Transport Scheduling Through the Ages. *Journal of Heuristics*. Vol. 4. n.º 1 (1998). p. 87-100. Disponível em WWW: <<https://doi.org/10.1023/A:1009694422257>>. ISSN: 1572-9397
- Wren, Anthony; Rousseau, Jean-Marc - Bus Driver Scheduling — An Overview. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. ISBN/ISSN: 978-3-642-57762-8
- Xie, Lin; Kliwer, Natalia; Suhl, Leena - Integrated Driver Rostering Problem in Public Bus Transit. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol. 54. (2012). p. 656-665. Disponível em WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812042450>>. ISSN: 1877-0428
- Zhou, Jue; Xu, Xiaoming; Long, Jiancheng; Ding, Jianxun - Integrated optimization approach to metro crew scheduling and rostering. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 123. (2021). p. 102975. Disponível em WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X21000127>>. ISSN: 0968-090X