U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FATORES DETERMINANTES DA PONTUALIDADE E DA REGULARIDADE DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO URBANO

MIGUEL DA SILVA MAIA FERREIRA PINTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor António José Fidalgo do Couto

Coorientador: Doutor António Manuel Cabral Vieira Lobo

FEVEREIRO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

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.

A meus Pais

Don't waste your time or time will waste you

Matthew Bellamy

AGRADECIMENTOS

Ao Professor António José Fidalgo do Couto, pela confiança demonstrada nas minhas capacidades, partilha de conhecimento, momentos de descontração, amizade e pelos conselhos dados, não só no âmbito desta dissertação, mas também para a vida pessoal e profissional.

Ao meu coorientador, Eng.º António Manuel Cabral Vieira Lobo, por me ter acolhido de braços abertos no seu espaço de trabalho, pela disponibilidade e ajuda prestada, empenho, dedicação, motivação, paciência e amizade, um muito obrigado. Sem dúvida este trabalho não teria o mesmo valor.

À ViaPorto e à Metro do Porto, S.A., pela partilha do material necessário à realização desta dissertação.

Uma palavra de apreço aos professores da secção de Vias de Comunicação, pela simpatia e afeto demonstrados, proporcionando um ambiente de trabalho fantástico.

Um agradecimento ao Pedro Oliveira, pela amizade e pronta disponibilidade para qualquer ajuda necessária.

A todos aqueles que contribuíram para que tivesse tido as melhores experiências possíveis nesta etapa, em especial à Mariana, Pina, Tânia, Gito, Tati, Migueis, Rafa, Assunção, Sofia, Catarina e ao pessoal dos grupos Mecs e Deque. São os melhores amigos que poderia ter.

Aos meus pais, por todos os sacrifícios, compreensão e motivação durante este longo e difícil caminho, carinho e por tudo o que me ensinaram e ensinam todos os dias. Os meus ídolos.

RESUMO

Atualmente, o meio de transporte preferencial da população portuguesa continua a ser o individual, apesar das medidas de apoio diretas e indiretas com o intuito de fomentar a utilização dos transportes públicos. Contudo, para que este seja fiável e atrativo do ponto de vista do utilizador, é necessário que o serviço prestado seja de qualidade e proporcione rápidas e cómodas deslocações. Dado o cariz de serviço público, é ainda necessária uma atualização constante em função das necessidades da população, bem como a supervisão por parte de uma autoridade estatal.

O objetivo principal deste trabalho consiste na identificação de fatores com influência no desempenho dos serviços de transporte ferroviário urbano a nível de pontualidade e de regularidade. Para tal, foram avaliados os horários de um caso de estudo, o metropolitano ligeiro do Porto, segundo dois indicadores de desempenho distintos, relativos a atrasos em chegadas ao destino e conservação de frequências ao longo da linha.

A metodologia aplicada corresponde, numa primeira fase, a técnicas de *data mining*, nomeadamente seguindo um processo iterativo para a formação de *clusters* com recurso ao algoritmo k-médias. Este processo permitiu identificar conjuntos de passagens em estações ou troços entre estações correspondentes a diferentes padrões de cumprimento de horários e frequências no sistema. De seguida, os conjuntos com características associadas a perturbações induzidas no normal funcionamento dos serviços são sujeitos a uma análise mais detalhada, avaliando-se a respetiva distribuição espacial ao longo da rede, bem como em função de variáveis temporais e de operacionalização do serviço.

Os resultados obtidos permitiram a clara distinção dos locais da rede mais suscetíveis da ocorrência de anomalias, derivadas da desregulação entre os horários em vigor no período considerado e as condições de circulação, bem como dos fatores responsáveis pelos desajustes verificados.

PALAVRAS-CHAVE: sistema de metropolitano, pontualidade, regularidade, data mining, análise de *clusters*.

ABSTRACT

Nowadays, the private car is still the most used transport mode in Portugal, despite the direct and indirect measures that have been applied to increase public transport ridership. Nevertheless, the reliability and quality of the services of public transport must be good enough to attract users, providing a fast and convenient alternative to the private car. Transit systems, as public services that are essential to the social welfare, must be regulated and should be able to adapt to changing mobility needs.

The major objective of this work consists in the evaluation of the factors contributing to the punctuality and regularity of urban rail transit systems. Therefore, using the case study of Porto metro, timetable adherence was evaluated according to two different performance indicators: delays and headway preservation along the journeys.

The methodology was focused on data mining techniques to find patterns related to timetable adherence, namely using an iterative procedure to generate clusters of trips through the k-means algorithm. The clusters associated with operation disturbances were subsequently analysed by exploring the relation between these disturbances and diverse spatial, temporal and operational variables.

Through the achieved results, it was possible to clearly locate the sections of the Porto metro network that are more prone to timetable deregulations, as well as to identify possible causes for such occurrences.

KEYWORDS: metro systems, punctuality, regularity, data mining, cluster analysis.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS 1

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 1

2. GENERALIDADES 3

2.1. CONCEITO DE METROPOLITANO 3

2.2. APONTAMENTOS HISTÓRICOS 3

2.3. TIPOS DE METROPOLITANO 5

2.4. CONFIGURAÇÕES DE REDES 5

2.4.1. REDE RADIAL 6

2.4.2. LINHA PRINCIPAL RAMIFICADA 6

2.4.3. LINHA PRINCIPAL ABASTECIDA POR LINHAS SECUNDÁRIAS 7

2.5. HORÁRIO 7

2.5.1. PRINCÍPIOS PARA A ELABORAÇÃO DE HORÁRIOS 8

2.5.1.1. Frequência e intervalos de passagem 8

2.5.1.2. Tempo de paragem nas estações 8

2.5.1.3. Tempo de percurso nos troços entre estações 9

2.5.1.4. Tempo de suporte 10

2.5.2. CONDICIONANTES NA ELABORAÇÃO DE HORÁRIOS 10

2.5.2.1. Tempo mínimo entre passagens 10

2.5.2.2. Zonas de convergência de linhas 10

2.5.2.3. Fatores externos ligados a outros tipos de tráfego 11

2.5.3. INDICADORES DE DESEMPENHO 11

2.5.3.1. Pontualidade 12

2.5.3.2. Regularidade 12

2.5.3.3. Oferta e disponibilidade do serviço 12

2.5.3.4. Material circulante 12

2.5.3.5. Procura 13
2.5.3.6. Exclusões 13

3. CASO DO METRO DO PORTO 15
3.1. NOÇÕES HISTÓRICAS 15
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE 15
3.3. MATERIAL CIRCULANTE 16
3.4. CONDICIONANTES ESPECÍFICAS PARA O HORÁRIO 17
3.4.1. CONVERGÊNCIA DE LINHAS 17
2.4.2. FATORES EXTERNOS 18
3.5. RECOLHA DE DADOS 18

4. METODOLOGIA 21
4.1. *DATA MINING* 21
4.2. ORGANIZAÇÃO DA ANÁLISE 22
4.3. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS 23
4.3.1. LIMPEZA E TRANSFORMAÇÃO DE DADOS 23
4.3.2. INTEGRAÇÃO DE DADOS 24
4.3.2.1. Variáveis temporais 24
4.3.2.2. Variáveis espaciais 24
4.3.2.3. Variáveis associadas a cada viagem 25
4.3.2.4. Variáveis relativas ao indicador “Atraso” 25
4.3.2.5. Variáveis relativas ao indicador “Dispersão do Intervalo” 28
4.4. ANÁLISE DE *CLUSTERS* 29
4.4.1. CRIAÇÃO DO PROCESSO NO RAPIDMINER 30
4.4.2. VARIÁVEIS ANALISADAS 31
4.4.3. TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS PARA O EXCEL 32

5. ANÁLISE DE RESULTADOS 33
5.1. ANÁLISE DO INDICADOR DE DESEMPENHO “ATRASO” 33
5.1.1. ANÁLISE DE *CLUSTERS* 33
5.1.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ELEVADOS ATRASOS LOCAIS 37
5.1.3. INFLUÊNCIA DAS RESTANTES VARIÁVEIS 47

5.2. ANÁLISE DO INDICADOR DE DESEMPENHO "DISPERSÃO DO INTERVALO" 50

5.2.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ELEVADAS DIFERENÇAS ENTRE INTERVALOS DE PASSAGEM 50

5.2.2. INFLUÊNCIA DAS RESTANTES VARIÁVEIS NA REGULARIDADE 53

6. CONCLUSÕES 57

6.1. CONCLUSÕES GERAIS 57

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 59

ANEXOS I

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Viagem de inspeção antes da inauguração do metro de Londres, 1862 5

Figura 2 - Fumo expelido pelas locomotivas a vapor do metro de Londres na viagem de comemoração dos 150 anos de existência, 2012 5

Figura 3 – Tipo de Rede Radial e Radial conetada 7

Figura 4 – Tipo de rede com linha principal ramificada 8

Figura 5- Tipo de rede com linha principal abastecida por linhas secundárias 8

Figura 6 – Disposição das parcelas para o cálculo do headway mínimo em transportes ferroviários ..11

Figura 7- Mapa da rede do metro do Porto 17

Figura 8 – Os dois tipos de veículos da frota do metro do Porto 18

Figura 9 – Esquematização da localização dos sensores em relação aos cais da estação 19

Figura 10 – As diferentes fases do processo de data mining 23

Figura 11 – Base de dados original de março de 2018 24

Figura 12 – Tabela auxiliar relativa aos códigos das estações e da distância do sensor ao centro do cais 27

Figura 13 – Variáveis representativas do indicador de desempenho “Atraso” 29

Figura 14 - Variáveis representativas do indicador de desempenho “Dispersão do Intervalo” 30

Figura 15 – Processo utilizado no software RapidMiner 31

Figura 16 - Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (março de 2018, exceto quartas-feiras) 40

Figura 17 - Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres - Senhor de Matosinhos (março de 2018, exceto quartas-feiras) 41

Figura 18 - Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa de Varzim – Estádio do Dragão (março de 2018, exceto quartas-feiras) 42

Figura 19 - Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa de Varzim (março de 2018, exceto quartas-feiras) 43

Figura 20 - Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI - Campanhã (março de 2018, exceto quartas-feiras) 44

Figura 21 - Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Campanhã - ISMAI (março de 2018, exceto quartas-feiras) 45

Figura 22 - Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto - Fânzeres (março de 2018, exceto quartas-feiras) 46

Figura 23 - Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres – Aeroporto (março de 2018, exceto quartas-feiras) 47

Figura 24 - Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em março de 2018 (exceto quartas-feiras) 52

Figura 25 - Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em agosto de 2018 (exceto quartas-feiras) 53

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 1 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (março de 2018).33

Tabela 2 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (abril de 2018) 35

Tabela 3 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (maio de 2018) ...35

Tabela 4 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (julho de 2018) ...36

Tabela 5 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (agosto de 2018) 36

Tabela 6 - Representatividade dos atrasos locais elevados nas viagens com atrasos acumulados ≥ 120 segundos 37

Tabela 7 - Distribuição por linha dos atrasos locais elevados 37

Tabela 8 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais por dia da semana, exceto quartas-feiras (%) 47

Tabela 9 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais por período horário, exceto quartas-feiras (%) 48

Tabela 10 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais por tipo de veículo, exceto quartas-feiras (%) 49

Tabela 11 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais por número de veículos utilizados por composição, exceto quartas-feiras (%) 49

Tabela 12 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais em função da troca de agente de condução no local, exceto quartas-feiras (%) 49

Tabela 13 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais em função da troca de agente de condução desde o início da viagem, exceto quartas-feiras (%) 49

Tabela 14 - Distribuição das passagens contidas nos clusters dos elevados atrasos locais em função da da variável de entropia de rede, exceto quartas-feiras (%) 50

Tabela 15 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por dia da semana, exceto quartas feiras (%) 53

Tabela 16 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por período horário, exceto quartas feiras (%) 54

Tabela 17 Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por número de veículos utilizados por composição, exceto quartas feiras (%) 55

Tabela 18 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D em função da troca de agente de condução no local, exceto quartas feiras (%) 55

Tabela 19 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D em função da troca de agente de condução desde o início da viagem, exceto quartas feiras (%) 55

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

UITP – Union Internationale des Transports Publics

PMO – Parque de Material e Oficinas

TMS – Traffic Management System

TTLog – Timetable Log

d_c – distância total percorrida pela dianteira da composição entre o circuito de via localizado à entrada e o centro do cais (m)

d_p – distância total percorrida pela traseira da composição entre o sensor situado à saída da estação e o centro do cais (m)

d'_c – distância entre o sensor de entrada e o centro do cais (m)

d'_p - distância entre o centro do cais e o sensor de saída (m)

l – comprimento da composição (m)

x – posição final (m)

x_o – posição incial (m)

v_o – velocidade inicial (m/s)

t – tempo que demora a percorrer deste a posição inicial à final

a – aceleração média (m/s^2)

a – desaceleração média (m/s^2)

Δt_c – correção do horário praticado à chegada

Δt_p – correção do horário praticado à partida

t'_c – tempo registado pela passagem da dianteira da composição pelo circuito de via de entrada

t'_p – tempo registado pela passagem da traseira da composição pelo circuito de via de saída

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Revolução Industrial, iniciada em Inglaterra, provocou avanços tecnológicos nas mais diversas áreas da sociedade. A invenção dos motores a vapor e de combustão impulsionou o desenvolvimento na área dos transportes, e, como resultado, surge o primeiro metropolitano em 1863. Desde então tem sido um sistema de transportes em constante evolução até à atualidade, assumindo-se como uma alternativa apelativa aos transportes individual e público rodoviário, devido à escalada de preços dos combustíveis fósseis e ao cada vez maior controlo de emissões de gases poluentes.

Para os utilizadores, o metro permite rápidas deslocações comparativamente com os transportes rodoviários por meio de canais segregados do restante tráfego, sobretudo dentro dos grandes centros urbanos. Todavia, o uso do transporte individual continua a ser o mais utilizado pela população portuguesa devido ao seu conforto e flexibilidade. Para ocorrer uma mudança de paradigma, são necessários esforços económicos e operacionais de forma a melhorar a visibilidade do metropolitano.

Esta dissertação insere-se na problemática da operação de sistemas de transporte ferroviário urbano e tem como principal objetivo a avaliação dos fatores com influência no respetivo cumprimento de horários. Para tal, será avaliada a pontualidade e a regularidade dos serviços de um caso de estudo, o sistema de metropolitano ligeiro da Área Metropolitana do Porto, e, posteriormente, identificadas as possíveis causas para os desajustes observados.

No final, é possível verificar a qualidade do serviço prestado, bem como perceber os locais que requererão maior atenção no planeamento de futuras intervenções com vista a melhorar os indicadores de desempenho utilizados.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se em seis capítulos, incluindo a Introdução, onde se fornece o enquadramento do tema da dissertação na mobilidade urbana e a definição dos principais objetivos.

O segundo capítulo consiste na definição e contextualização histórica dos transportes ferroviários urbanos e apresenta uma base teórica relativa à elaboração de horários.

No terceiro capítulo, é apresentado o sistema de transportes em estudo, onde se caracteriza a rede e a operação do mesmo.

O quarto capítulo corresponde à metodologia utilizada. É apresentada uma componente teórica sobre do processo de *data mining*, seguindo-se o tratamento das bases de dados utilizadas e a apresentação dos indicadores de desempenho a avaliar.

O quinto capítulo consiste na interpretação dos resultados obtidos, identificando as causas para os desajustes entre o horário planeado e as condições de circulação, bem como a avaliação de todos os fatores considerados nas bases de dados com recurso a uma análise de sensibilidade.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões retiradas sobre o cumprimento de horários do metropolitano ligeiro do Porto e possíveis trabalhos futuros a desenvolver.

2
GENERALIDADES

2.1. CONCEITO DE METROPOLITANO

Segundo a UITP[1], o metropolitano, comumente denominado pela sua abreviatura metro, é um sistema de transportes urbano no qual os veículos, movidos a energia elétrica, circulam sobre carris com grande capacidade e frequência de serviços. Na maioria dos casos, circula em canais segregados do restante tráfego e o seu traçado pode ser subterrâneo, sobre viadutos ou à superfície. Devido a esta característica, o metro é o modo de transporte mais eficiente para operacionalizar em rede, visto não estar sujeito a congestionamentos rodoviários, bem como a fatores externos como condições climatéricas adversas, caso seja subterrâneo. É, na verdade, nesta disposição que apresenta mais vantagens, visto que o seu traçado não requer necessariamente ser alinhado com os arruamentos existentes à superfície, sendo geralmente projetado de forma a potencializar a sua velocidade de operação e o conforto, com traçados caracterizados por curvas de maior raio. Pode ter contacto com os carris através de rodados metálicos, em que o seu funcionamento é semelhante ao dos comboios, ou então através de pneus de borracha.

2.2. APONTAMENTOS HISTÓRICOS

A Revolução Industrial teve lugar nos séculos XVIII e XIX e, entre melhorias nos mais diversos ramos da sociedade e da indústria, teve impacto nos transportes após a invenção dos motores a vapor e de combustão. A sua origem teve lugar em Inglaterra e imediatamente provocou um aumento da industrialização, que por sua vez forçou uma maior procura de mão-de-obra originando um fenómeno de êxodo rural, em que a população das pequenas localidades migrou para as cidades, nomeadamente para a capital inglesa.

O grande aumento demográfico de Londres, de cerca de um milhão de habitantes para três milhões entre 1801 e 1861[2], veio provocar grandes congestionamentos no acesso ao centro da cidade por aqueles que se dirigiam para os respectivos empregos. Aliado a este fator, o desenvolvimento na área de construção de túneis permitiu a construção de uma estrutura sob o rio Tamisa, dando mais força ao projeto do metropolitano pensado desde a década de 1830. Assim, o primeiro sistema de transportes subterrâneo é aberto ao público em 1863 (figura 1), transportando cerca de 38.000 pessoas no seu primeiro dia de funcionamento e atingindo a marca de 9,5 milhões ao fim de um ano de circulação.



Figura 1- Viagem de inspeção antes da inauguração do metro de Londres, 1862[3]

O metro de Londres foi assim um fator determinante no crescimento da cidade, acompanhando toda a sua evolução com a criação de novas linhas no século seguinte, tendo inclusivamente um papel crucial durante a Segunda Guerra Mundial. Aquando dos bombardeamentos sobre a capital britânica, parte da população refugiou-se nos seus túneis, tendo também sido utilizados para o funcionamento de serviços indispensáveis à nação, como a produção de componentes de armamento.

Com a evolução da tecnologia, o primeiro metropolitano eletrificado surge também em Londres em 1890, sendo que, no tempo da Primeira Guerra Mundial, os transportes subterrâneos movidos a electricidade já se tinham alastrado a cidades como, por exemplo, Atenas, Berlim, Boston, Budapeste e Paris, entre outras. Esta eletrificação permitiu melhorar as condições de ventilação dos túneis, que anteriormente se viam constantemente cobertos de fumo proveniente das locomotivas a vapor e que provocavam um grande incómodo aos passageiros, como mostra a figura 2.



Figura 2 - Fumo expelido pelas locomotivas a vapor do metro de Londres na viagem de comemoração dos 150 anos de existência, 2012 [3]

Na atualidade, a China é o país com maior número de sistemas de metro, fixado em 31, contabilizando mais de 4500 quilómetros de extensão. O metro de Nova Iorque é o que possui um maior número de paragens, 424 se as estações de transferência de linha forem consideradas como uma só.

2.3. TIPOS DE METROPOLITANO

Em termos de classes, os sistemas de metropolitano podem-se dividir entre pesados e ligeiros. O metropolitano pesado apresenta velocidades de percurso e acelerações elevadas, e é preferencial em redes com uma procura muito elevada, podendo um serviço possuir um elevado número de carruagens, levando assim a que os cais de embarque sejam de grandes extensões. Tal como mencionado anteriormente, o canal é segregado do restante tráfego urbano e sem interseções de nível, o que permite, em alguns casos, uma circulação automatizada, ou seja, sem agente de condução.

O metropolitano ligeiro apresenta velocidades e acelerações mais reduzidas do que o metropolitano pesado, podendo ter intersecções de nível com o tráfego pedonal e rodoviário. Nestes casos, a prioridade de passagem é sempre dada ao sistema ferroviário, exigindo, no entanto, a condução por um agente especializado. O metropolitano ligeiro é por vezes confundido, quando a sua circulação é superficial, com o sistema de *tram*. No entanto, a circulação em canal dedicado do primeiro garante, face ao segundo, uma maior capacidade do serviço por não se encontrar sujeito ao congestionamento rodoviário. É, aliás, este o tipo de circulação mais comum do metropolitano ligeiro, sendo que geralmente apenas se encontra em túnel em zonas com um maior nível de urbanização como, por exemplo, nos centros das cidades.

2.4. CONFIGURAÇÕES DE REDES

O objetivo primordial dos sistemas de transportes públicos consiste em proporcionar à população alvo uma solução de mobilidade rápida e eficiente a custos reduzidos, pelo que é essencial elaborar estudos com o intuito de se avaliar as opções disponíveis e se decidir pelas mais vantajosas, especialmente no caso do metropolitano. A construção de linhas férreas, bem como de estruturas de segregação do restante tráfego, têm um custo elevado, criando inclusivamente incómodos aos habitantes devido a obras e cortes na rede viária das cidades. Deste modo, a implementação de um sistema de transportes públicos depende de muitos fatores, entre os quais a procura e a disposição geográfica da área em estudo.

A procura é estudada com base na formação de matrizes origem/destino, onde são identificadas as viagens da população no seu quotidiano, originando pólos geradores de tráfego[4]. A interligação destes serão, de forma genérica, os pontos base para a criação da rede. Acoplando a disposição geográfica destes pontos, pode-se fazer uma primeira leitura do caso, visualizando possíveis términos e locais intermédios da rede, essenciais a providenciar uma arquitetura da rede adequada à potencial distribuição de procura.

No caso de um sistema de metro, é importante a conciliação com os transportes públicos já existentes, não só a nível de serviços mas também em relação às infraestruturas ferroviárias previamente existentes. A introdução de um sistema de transportes separado do restante tráfego é uma mais-valia para substituir serviços rodoviários com longos tempos de percurso, nomeadamente em horas de ponta. Assim, a interação entre os diversos operadores é fundamental para uma rede mais eficiente. Na eventualidade da existência de locais previamente servidos por ferrovias, e caso sejam importantes núcleos de tráfego, será importante o seu interface com o metropolitano, salvaguardando os casos em que tal possa constituir uma eventual duplicação de serviços[5]. É também possível proceder à substituição do sistema de transporte ou o fazer um aproveitamento das vias existentes de serviços extintos.

Devido à quantidade e complexidade de formas possíveis que uma rede de metropolitano pode ter, apresentam-se apenas três configurações típicas das redes de metropolitano.

2.4.1. REDE RADIAL

Este tipo de solução consiste na ligação direta de pontos periféricos ao centro da cidade principal, em que cada linha possui o seu próprio canal (figura 3). Normalmente caracterizada por elevados volumes de passageiros em horas de ponta, tem como principal vantagem o facto de não ser necessário realizar qualquer tipo de transbordo para quem se desloca para o centro. Contudo, para quem se pretende deslocar entre pontos da periferia, terá de o fazer se pretende utilizar este meio de transporte. Estes fatores levam a que as estações centrais sejam de grandes dimensões, a fim de evitar sobrelotações. A estas estações estão geralmente associados términos para compensar desajustes da procura e da oferta[4] o que, aliado ao espaço necessário para a livre circulação de passageiros, é limitado pelas condições do centro da cidade, onde normalmente a área disponível para obras destas dimensões é escasso.

Outra desvantagem consiste na criação de canais próprios, tantos quantos o número de términos periféricos, o que consiste numa solução dispendiosa, nomeadamente se as linhas forem subterrâneas ou elevadas.

As redes radiais podem evoluir, caso a procura assim o exija, para redes radiais conectadas, em que algumas linhas permitem a ligação direta entre pontos periféricos.

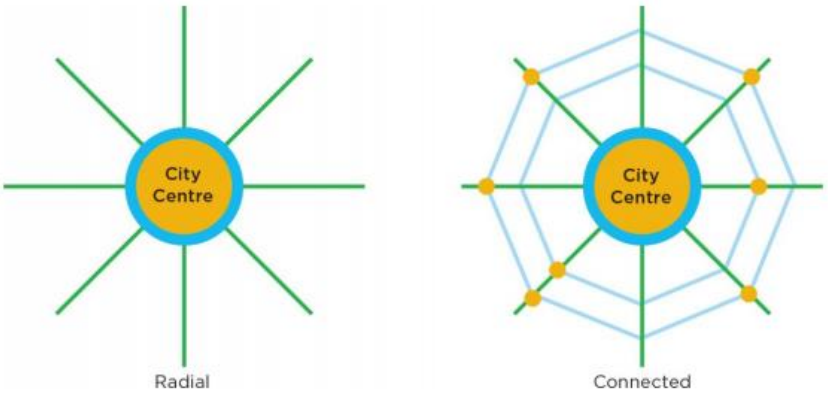


Figura 3 – Tipo de Rede Radial e Radial conetada[6]

2.4.2. LINHA PRINCIPAL RAMIFICADA

Como podemos observar na figura 4, disposição configuração em formato de linha principal ramificada consiste num canal comum a serviços distintos na zona central da cidade principal, que se vão separando em diversos canais para abranger a periferia, proporcionando assim uma ligação direta à população das cidades vizinhas sem recorrer a transbordos. Como desvantagens tem a desconexão por via deste sistema de transporte entre pontos da mesma cidade central, sendo que caso um indíviduo queira-se deslocar para outra zona da mesma terá que o fazer por outro meio, e ainda eventuais problemas de saturação nas vias partilhadas, onde o volume de circulação poderá estar próximo da capacidade do canal.

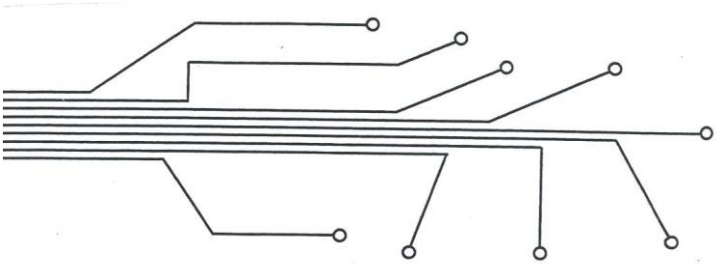


Figura 4 – Tipo de rede com linha principal ramificada[4]

2.4.3. LINHA PRINCIPAL ABASTECIDA POR LINHAS SECUNDÁRIAS

A configuração em linha principal abastecida por linhas secundárias traduz uma arquitetura intermédia em relação às duas anteriores, na qual uma linha principal com ligação ao centro é alimentada por serviços oriundos da periferia, tal como representado na figura 5. Esta solução apresenta como desvantagem a realização de transbordos para chegar da periferia ao centro da cidade, porém garante uma área central mais abrangida pelo metro face à linha ramificada e bons indicadores operacionais visto todas linhas serem independentes entre si.

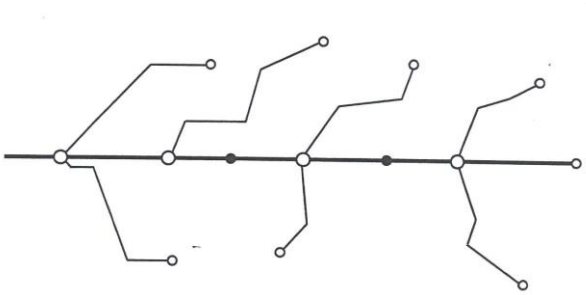


Figura 5- Tipo de rede com linha principal abastecida por linhas secundárias

2.5. HORÁRIO

As medidas diretas e indiretas de apoio ao transporte público tentam contrariar a tendência do aumento do uso do transporte individual no quotidiano da sociedade. O conforto, a flexibilidade e a privacidade do transporte individual são fatores difíceis de bater pelo transporte público, contudo existem grupos da sociedade que, por motivos monetários ou por mobilidade reduzida, apenas têm o transporte público como único meio para se moverem. Por outro lado, em termos ambientais, de segurança rodoviária e de congestionamento, o uso do transporte público poderá potenciar uma melhor qualidade de vida da população. É, no entanto, necessário manter índices de qualidade elevados para encorajar o seu uso, assegurando a disponibilidade e a frequência de serviço necessárias, bem como outras exigências não diretamente relacionadas com a oferta, como sejam a segurança ou a limpeza do sistema. É hoje consensual que a degradação do serviço leva ao decréscimo de passageiros e, por sua vez, esse decréscimo de procura tende a levar a um desinvestimento no sistema com consequências nefastas na qualidade do serviço.

Um dos fatores fundamentais de qualidade de serviço traduz-se na elaboração e cumprimento de horários que satisfaçam a procura associada das zonas abrangidas pelo sistema. No caso do transporte público

rodoviário, o risco de incumprimento é tradicionalmente superior devido ao congestionamento nos grandes centros urbanos, apesar da criação de vias exclusivas BUS e da requalificação de vias. Devido à separação física entre as vias ferroviárias e a envolvente rodoviária e pedonal, no caso do metropolitano este risco será menor, podendo, ainda assim, ocorrer nas interseções, em caso de bloqueio das mesmas, apesar da prioridade ser dada ao veículo a circular sobre carris. Existem, contudo, outros fatores que podem provocar incumprimentos de horário.

No que respeita a medidas indiretas de promoção do transporte público, estas consistem, por exemplo, na aplicação de taxas e impostos à circulação dos automóveis e no pagamento e diminuição da oferta de lugares de estacionamento.

2.5.1. PRINCÍPIOS PARA A ELABORAÇÃO DE HORÁRIOS

Tal como mencionado anteriormente, são realizados vários estudos com base em matrizes origem/destino com vista à obtenção da distribuição da procura na área onde vai ser implementado o novo sistema de transporte público. No âmbito desta dissertação, em que se trata do transporte ferroviário urbano, os princípios gerais para o seu dimensionamento a nível de horário são idênticos ao transporte rodoviário, apenas divergindo nas condicionantes impostas pelas especificações de operação. As condicionantes para a elaboração de horários estão também associadas à configuração da própria rede. Tendo em conta o caso de estudo, será dado um maior foco a sistemas de transportes com vias partilhadas.

2.5.1.1. Frequência e intervalos de passagem

A frequência refere-se ao número de veículos que passam num determinado ponto da rede num dado período de tempo, enquanto os intervalos de passagem dizem respeito à distância temporal entre a passagem de dois veículos consecutivos nesse mesmo ponto. Estes indicadores traduzem o inverso um do outro, possuindo a mesma utilidade prática. São a base de um horário para uma determinada linha, pois permitem estabelecer o equilíbrio entre oferta e procura com vista à otimização do sistema.

Os intervalos de passagem podem ser variáveis ao longo do dia, ajustando-se entre o normal funcionamento e as horas de ponta, e ao longo do ano (sazonalmente), sendo que regularmente no Verão é praticado um horário diferente do que no resto do ano devido à variação da procura nos períodos de férias. Assim, nos casos de zonas especialmente turísticas, poderá ser exigida uma maior oferta, e em zonas mais direcionadas para a vida profissional o oposto. Todavia, a frequência poderá ter que ser limitada devido à capacidade do canal, bem como ao material circulante e agentes de condução disponíveis.

2.5.1.2. Tempo de paragem nas estações

O tempo de paragem para entrada e saída de passageiros apresenta-se como das maiores problemáticas no planeamento de um horário pela sua difícil estimação, sendo das principais causas de atrasos e adiantos dos serviços de metro. Existem vários parâmetros que fazem oscilar o intervalo de tempo de paragem observado, parâmetros que têm uma probabilidade de ocorrência e que têm que ser considerados de acordo com esta.

O maior influenciador na determinação do tempo de paragem é, naturalmente, a procura associada a uma dada estação. Quanto maior a afluência de passageiros, maior terá de ser este intervalo temporal de forma a proporcionar movimentos de forma ordeira e com maior conforto e segurança.

De uma forma geral, o tempo de paragem nas estações será variável consoante a sua localização e a hora do dia a considerar. Como é expectável, em períodos de ponta horária e em zonas com maior densidade populacional, o tempo associado a entrada e saída de passageiros será maior, contrastando com estações em zonas menos urbanizadas e em horas de menor movimento.

A boa combinação entre a estrutura e organização do cais de embarque e a disposição e tipologia das portas do material circulante também contribui para um fluído movimento de passageiros. A nível do cais, este deve ser extenso o suficiente para que todas as portas dos veículos possam ser utilizadas, bem como ter uma área de implantação e distribuição de acessos adequados para uma igual repartição dos passageiros por porta[7]. A sua altura relativamente à via de circulação deve ser semelhante à distância desta última e a parte inferior da porta do material circulante com o intuito de não provocar um desnível entre ambos, evitando causar incómodo aos passageiros, especialmente utilizadores com mobilidade reduzida ou com outros veículos, como bicicletas ou carrinhos de bebé, bem como proporcionar velocidades de escoamento superiores. As portas deverão possuir dimensões adequadas à procura estimada, com o objetivo também de melhorar a qualidade e velocidade do embarque e desembarque. Não obstante estes fatores de dimensionamento, é importante a informação disponível, especialmente nos primórdios de operação do sistema de transporte ferroviário em estudo, sobre a prioridade associada a estes movimentos, em que os passageiros que desejam entrar deverão deixar aqueles que pretendem sair efetuar o seu movimento primeiro, evitando os constrangimentos associados ao cruzamento de ambos os movimentos.

Por último, considere-se ainda as trocas de agentes de condução. Deverão ser efetuadas em estações com maior afluência, com tempos de paragem associados superiores às restantes, de forma a disfarçar esta rotação de turnos enquanto se dão as movimentações de passageiros, ou nos términos, que serão suficientes para absorver este tipo de perdas temporais.

2.5.1.3. Tempo de percurso nos troços entre estações

O tempo de percurso nos troços, em junção com o tempo de paragem nas estações, perfaz o tempo total teórico em que um serviço é realizado. Aquando a fase de projeto, são definidas as velocidades de circulação mediante as condições do traçado da linha que, reunindo com as características motoras do material circulante a ser utilizado, permite calcular o tempo necessário para o veículo se deslocar de um ponto da rede para outro.

Num canal segregado, estas variáveis vão depender apenas do traçado em planta no caso da velocidade, e do perfil longitudinal no caso das acelerações. A velocidade de circulação em curva poderá ser inferior à registada nos alinhamentos retos caso os raios associados não o permitam devido à limitação espacial por construções já existentes. Quanto às acelerações, estas podem ser afetadas por rampas de grande inclinação à entrada ou saída de estações, pelo que nesses casos o material circulante demora mais ou menos tempo a atingir a velocidade normal de circulação, ou necessita de maior ou menor distância para uma frenagem segura e confortável para os passageiros no caso da chegada à estação.

Em troços onde se verificam interseções com o restante tráfego, a velocidade deve ser reduzida, apesar de a prioridade ser sempre dada ao metro. É também necessária uma condução mais lenta e prudente quando a circulação de peões na envolvente é permitida, sendo este um ponto a ter em conta no cálculo do tempo de percurso.

2.5.1.4. Tempo de suporte

Os tempos de suporte correspondem àqueles entre a chegada de uma composição ao destino final e a partida para uma nova viagem. Também denominado de tempo de terminal, é utilizado para incluir inversões de marcha, troca de cabine de condução e possíveis trocas entre agentes de condução. Adicionalmente, são úteis para absorver um eventual atraso à chegada caso este não seja muito elevado, caso contrário a próxima viagem terá início com um atraso inevitável.

2.5.2. CONDICIONANTES NA ELABORAÇÃO DE HORÁRIOS

Apesar de os princípios apresentados conterem algumas condicionantes na estimação dos seus valores finais, serão apresentados neste subcapítulo outros cuidados, mais gerais, a ter em conta na elaboração de horários.

2.5.2.1. Tempo mínimo entre passagens

O tempo mínimo entre passagens é um dado relevante que afeta diretamente a capacidade das linhas. Este vai depender essencialmente das características motoras do material circulante e da velocidade praticável, sendo proporcional ao valor *headway* mínimo de segurança. Entende-se por *headway* a distância entre a frente de dois veículos a circular consecutivamente no mesmo canal e no mesmo sentido. O seu valor mínimo é influenciado pela velocidade praticada, pelos valores de frenagem média e máxima dos veículos e pelo tempo de reação do agente de condução. Com a evolução da tecnologia, as distâncias de segurança a manter entre veículos a circular no mesmo canal é controlada através de sensores e coordenada no local por meio de semaforização, como representado na figura 6.

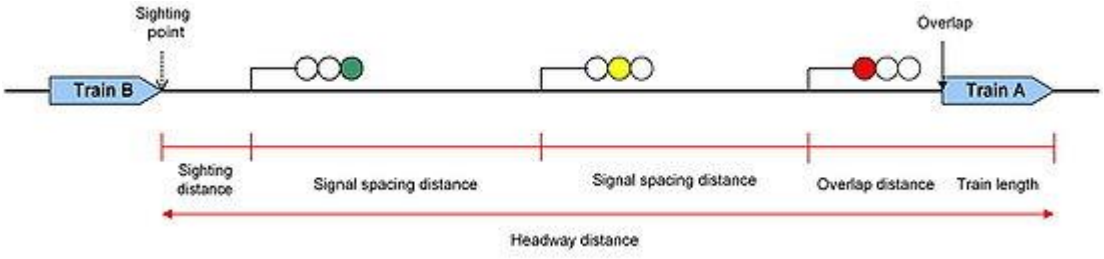


Figura 6 – Disposição das parcelas para o cálculo do headway mínimo em transportes ferroviários

Em condições normais, o tempo mínimo entre passagens tem que ser assegurado em canais partilhados por diferentes serviços, já que num canal em que apenas é utilizado por uma linha, a frequência da mesma terá que já incorporar à partida esse intervalo de segurança.

2.5.2.2. Zonas de convergência de linhas

Independentemente de as zonas de convergência de linhas poderem ser localizadas em troços ou em estações, é necessário uma sintonia de horários de forma a minimizar a entropia entre serviços. Quando se dá esta junção em estações, é usual existir um cais adicional de forma a facilitar a entrada da via desviada, e possibilitar um possível tempo de espera para entrar na via principal, devido a desfasamentos

do horário previsto e praticado, aumentando o tempo parado na estação para entrada e saída de passageiros e assim respeitar os tempos mínimos entre passagens.

A coordenação de entrada nas zonas de convergência dos serviços é fundamental para evitar a propagação de desregulações, pelo que os segmentos anteriores devem estar bem dimensionados de forma a não provocar constrangimentos nestes pontos.

2.5.2.3. Fatores externos ligados a outros tipos de tráfego

É uma problemática mais relacionada com o sistema *tram*, no entanto existem casos nos quais o metropolitano à superfície tem, por vezes, interseções com tráfego rodoviário e pedonal. Nestes casos, apesar da prioridade ser sempre dada ao metro, é necessário considerar velocidades inferiores para garantir uma maior segurança, não só aos passageiros mas também a todos os indivíduos presentes na envolvente. Adicionalmente, em troços nos quais as interseções são muito movimentadas em períodos de ponta, poderá ser acrescentado algum tempo de forma a conter pequenos atrasos devido a bloqueios da via por parte de veículos rodoviários em tempos de vermelho para os mesmos.

2.5.3. INDICADORES DE DESEMPENHO

Apesar de todos estes príncipios e condicionantes supramencionados, num serviço de transportes públicos irão sempre ocorrer perturbações, alguns deles previsíveis e outros imprevisíveis, que vão alterar o normal funcionamento do sistema. Assim, um horário ferroviário tem que ser capaz de absorver atrasos, perturbações e variações das condições de operação sem perder funcionalidade[8].

Os atrasos, provocados por pequenas perturbações devem ser compensados e é perante esta problemática que estão inseridos os conceitos de estabilidade, viabilidade e robustez. Estes atrasos podem ser primários ou secundários, consoante a fonte de ocorrência. Os serviços que se atrasam em face de perturbações de forma direta são considerados primários, enquanto aqueles que sofrem propagação de atrasos pelo chamado "efeito dominó" dos anteriores são considerados secundários. É neste efeito que se insere a estabilidade, definida pela capacidade que o horário possui para compensar atrasos e regressar ao estado desejado[9], e que deve ser garantida por meios de recuperação de tempo e *buffers*. Um *buffer* é o tempo adicionado ao *headway* mínimo com o intuito de evitar a transmissão de atrasos de uma viagem para as seguintes, enquanto o tempo de recuperação consiste num tempo de operação superior ao necessário. Por sua vez, a viabilidade e robustez de um horário são conceitos intimamente relacionados[10]. O primeiro diz respeito à utilização da capacidade de uma via ou de um canal. A viabilidade deve garantir o uso planeado da capacidade, em particular quando veículos de linhas distintas confluem, nas zonas de convergência, o que pode levar a desvios de tempos planeados, tendo consequências a nível de atrasos e da própria capacidade. À aptidão de os serviços terem os desvios mencionados até a uma certa extensão temporal, mas conseguirem ser viáveis, chama-se de robustez. A estas estas características juntam-se outras, como a resiliência, que consiste na flexibilidade de um horário em prevenir ou reduzir atrasos secundários, e ainda a ocupação da infraestrutura, como principais grupos descritos pelos indicadores de desempenho[8].

Uma forma de fomentar uma boa qualidade do serviço é a de, por um lado, premiar essa qualidade através da análise dos indicadores de desempenho ou, por outro lado, penalizar caso estes não representem uma oferta satisfatória aos utilizadores e não cumpram limites previamente estabelecidos, devendo ser evitada a utilização de indicadores fora do controlo dos operadores do sistema de transportes[4].

2.5.3.1. Pontualidade

Os indicadores de desempenho relativos à pontualidade são geralmente direcionados para a deteção da ocorrência de atrasos e respetiva quantificação. Na avaliação em serviços de comboios na Europa, os valores para uma viagem ser considerada como atrasada encontram-se, na maioria dos países, nos cinco minutos. A título de exemplo, na Suíça e na Holanda, os limites são de quatro e três minutos respetivamente, enquanto no Japão uma viagem com 10 a 15 segundos de atraso acumulado será penalizada[11]. Em sistemas ferroviários urbanos, os valores limite pelos quais uma viagem se considera atrasada serão mais reduzidos, devido às extensões dos percursos e à frequência e tráfego nas vias.

Apesar de os atrasos serem mais comuns, os adiantos também possuem um limite de tolerância, o qual não devem ultrapassar. Estes podem ser prejudiciais para o normal funcionamento do sistema de transportes, especialmente no que respeita à qualidade de serviço oferecida aos utilizadores, na medida em que poderá motivar a perda de conexões e aumentar os períodos de espera, nomeadamente em estações com interface intermodal. Os valores toleráveis poderão ser inferiores aos dos atrasos devido a estas consequências.

2.5.3.2. Regularidade

Os indicadores de desempenho associados à regularidade visam assegurar a manutenção da frequência ao longo das linhas de viagens consecutivas. Os seus valores de desfasamento limite assemelham-se aos dos atrasos, e são medidos através da diferença entre os intervalos planeados e os intervalos de passagem observados em pontos de controlo da rede predefinidos.

2.5.3.3. Oferta e Disponibilidade do Serviço

A caracterização da oferta é geralmente traduzida pela produção de transporte, expresso pelos indicadores em carruagens.km e lugares.km e que consiste na soma das distâncias efetuadas por cada viatura da frota num dado período de tempo, normalmente um ano.

A disponibilidade do serviço está relacionada com a quantidade e qualidade da oferta produzida de forma a satisfazer a procura associada. Este indicador pode ser avaliado através da comparação entre os quilómetros realizados e os que estavam previstos ser percorridos num certo período de tempo, mas também da realização de um número mínimo de viagens, ou ainda da contabilização do número de viagens canceladas e não realizadas.

2.5.3.4. Material Circulante

A frota de um sistema de transportes ferroviário deverá ser constituída por um número previamente definido para satisfazer as frequências aplicadas nas diferentes linhas e veículos de reserva para colmatar possíveis avarias e acidentes. A fiabilidade e a disponibilidade dos veículos são os métodos mais comuns para analisar a sua qualidade[8]. A fiabilidade refere-se à quantidade de avarias ocorridas por intervalo de tempo, enquanto que a disponibilidade compara a quantidade de veículos que foi disponibilizada em horas de maior procura com a teoricamente necessária, incluindo veículos de reserva.

2.5.3.5. Procura

A análise mais comum relativamente à procura é realizada segundo indicadores de performance relativos ao número de passageiros transportados, por quilómetro de rede por veículo[5]. Os indicadores de desempenho poderão ainda distinguir um sistema de metropolitano pela informação disponibilizada aos utilizadores, ao nível da bilhética ou pontuais alterações de horário. Para qualificar o nível de serviço praticado poderá ainda ser analisado o atraso dos passageiros para chegarem ao seu destino.

2.5.3.6. Exclusões

Existem tipos de perturbações que não são da responsabilidade da entidade gestora do sistema de transporte, por exemplo com origem em fatores externos. De forma a que estes acontecimentos não tenham influência na avaliação da performance, as viagens afetadas direta ou indiretamente são designadas como exclusões, ou seja, não são incluídas no cálculo dos diversos indicadores de desempenho.

3
CASO DO METRO DO PORTO

3.1. NOÇÕES HISTÓRICAS

A Metro do Porto, empresa responsável pelo sistema de metropolitano da Área Metropolitana do Porto, foi fundada em 1994 com o objetivo de satisfazer as necessidades de mobilidade desta conurbação. Em 1996, foi apresentada a solução final para as primeiras quatro linhas a serem construídas, A, B, C e D.

A 26 de Maio de 2001, foi apresentado publicamente o primeiro veículo da frota inicial de 72 veículos, o Eurotram MP-001, tendo mais tarde, em Dezembro do mesmo ano, entrado em testes entre o PMO de Guifões e a Senhora da Hora. Um ano depois, é finalmente inaugurada parte da linha azul (A), até à Trindade, sendo que o troço até ao Estádio do Dragão é apenas concluído e aberto ao público em Junho de 2004[12]. Em 2005 abrem as restantes três linhas, apesar que mais curtas do que o verificado atualmente. Nota ainda para a inauguração das linhas E (Aeroporto) e F (Fânzeres) nos anos de 2006 e 2011, respetivamente.

3.2. CARATERIZAÇÃO DA REDE

A rede do metro do Porto é composta por seis linhas, as quais servem sete concelhos da Área Metropolitana do Porto, numa extensão total de 67 quilómetros. São elas:

- A linha azul, ou linha A: liga a estação de Senhor de Matosinhos ao Estádio do Dragão;
- A linha vermelha, ou linha B: é a que tem maior extensão, transportando passageiros desde a Póvoa de Varzim ao Estádio do Dragão;
- A linha verde, ou linha C: entre o ISMAI e Campanhã;
- A linha amarela, ou linha D: único serviço que não partilha o canal ferroviário com as restantes na totalidade da sua extensão, cruzando-as na estação da Trindade e tendo como términos o Hospital São João e Santo Ovídio;
- A linha roxa, ou linha E: leva os utilizadores do Aeroporto até ao Estádio do Dragão, passando pelo centro da cidade do Porto;
- A linha laranja, ou F: a última a ser construída até à data do presente trabalho, ligando a Senhora da Hora a Fânzeres.

Na imagem 7, podemos visualizar a disposição espacial dos serviços que o metropolitano do Porto oferece e suas estações, bem como a particularidade de que, entre a Senhora da Hora e o Estádio do Dragão, todas as linhas, exceto a amarela, partilham o mesmo canal. É assim notória a necessidade coberta pelo sistema em servir o centro da cidade aos habitantes dos concelhos periféricos. É também observada a diferente disposição da linha D, tal como mencionado anteriormente, sendo que as suas vias intersetam os restantes serviços através de um canal subterrâneo na estação Trindade, enquanto que os cais que servem as linhas A, B, C, E e F neste local se localizam à superfície.



Figura 7- Mapa da rede do metro do Porto

Da extensão total de 67 quilómetros, 7,7 são realizados sob o solo[13]. A grande maioria destes últimos são realizados dentro da cidade do Porto em três túneis, o mais longo entre a Ponte D. Luís I e a estação do Pólo Universitário e dois nos troços adjacentes à Trindade, um mais curto até à Lapa e o outro até Campanhã. Por último, parte do percurso entre Contumil e Rio Tinto é também subterrâneo, perfazendo os quatro túneis comerciais existentes. É de ressalvar que existem locais onde a estação, e logicamente seus acessos, é enterrada, contudo não se consideram como túneis (como por exemplo as estações Casa da Música e Estádio do Dragão).

3.3. MATERIAL CIRCULANTE

Os veículos que começaram a circular inicialmente nas linhas do metro do Porto são do tipo *Eurotram*, fabricados pela *Bombardier* originalmente para o metropolitano ligeiro de Estrasburgo, mas também adotados em Milão. As três versões apresentam algumas diferenças entre si, sendo que no sistema ferroviário português cada carruagem é composta por três módulos com um total de 80 lugares sentados e 136 em pé. Com 35 metros de comprimento e 2,65 de largura, atinge uma velocidade máxima de 80 km/h e tem um piso rebaixado, facilitando a entrada e saída de passageiros, especialmente os de mobilidade reduzida. Foram adquiridos 72 exemplares, cuja numeração é de MP-001 a MP-072[14].

Devido à extensão das linhas B e C, em 2010 começaram a circular 30 novos veículos do modelo *Flexity Swift*, também produzidos pela companhia canadiana *Bombardier*. Também conhecidos por *Tram-Train*, têm 37 metros de comprimento e uma maior capacidade de transporte que os seus antecessores, contando com 100 assentos e 148 lugares em pé. Com estes veículos conseguiu-se reduzir o tempo de viagem entre os términos das linhas anteriormente mencionadas, bem como aumentar o conforto dos utilizadores. A figura 8 mostra a aparência dos dois tipos de veículo, a esquerda o *Eurotram* e à direita o *Tram-Train*[14].



Figura 8 – Os dois tipos de veículos da frota do metro do Porto

De mencionar que ambos os tipos de veículos se podem acoplar em conjuntos de dois, aumentando a capacidade do serviço. À data deste trabalho, a frota é composta por estes 102 exemplares, sendo que os *Tram-Train* são numerados de forma idêntica aos *Eurotram*, de MP-101 a MP-130.

3.4. CONDICIONANTES ESPECÍFICAS PARA O HORÁRIO

Devido à configuração da rede e às condições de circulação apresentadas em algumas zonas, o horário do metro do Porto deverá ter em conta as condicionantes apresentadas no capítulo anterior de forma a ser robusto e viável. Como se pode atentar na figura 7, o entroncamento de linhas cria três zonas de potenciais conflitos, mais concretamente nas estações "Verdes", "Fonte do Cuco" e "Senhora da Hora", sendo esta última a mais crítica por envolver quatro linhas face a duas e três nas outras estações, respetivamente. Relativamente à possível interferência de outro tipo de tráfego à normal circulação do metro, existem de facto algumas zonas nas quais será necessário ter em conta esta condicionante, como se verá mais adiante.

3.4.1. CONVERGÊNCIA DE LINHAS

Na Senhora da Hora ocorre a ligação da linha A às linhas B, C e E. Fisicamente esta junção ocorre no troço entre a mesma e a estação "Fonte do Cuco", sendo um cruzamento de nível que, devido a tal disposição, poderá criar constrangimentos à normal circulação dos veículos. A via desviada entra nesse ponto na via principal, pelo que o percurso é realizado em duas vias, uma em cada sentido, apesar de ambas as estações limite do troço estarem munidas de mais de dois cais de embarque.

O entroncamento da linha C com as linhas B e E é efectuado logo após a estação "Fonte do Cuco" no sentido Norte – Sul. Tal como na ligação da linha A, o entroncamento das linhas é de nível potenciando conflitos na mudança de via dos serviços.

Por último, a ligação das linhas B e E é realizada na estação "Verdes", sendo que o cruzamento é desnivelado antes da mesma estação segundo o sentido Norte – Sul. Os dois serviços unem-se neste sentido para dar seguimento às respetivas viagens imediatamente após a estação, contudo devido às

baixas frequências de ambas as linhas, a probabilidade de ocorrência deste único potencial conflito é diminuta.

3.4.2. FATORES EXTERNOS

Na rede de metro do Porto existem segmentos nos quais o transporte ferroviário interage com o tráfego pedonal e rodoviário. Por motivos de segurança, a velocidade de circulação deverá ser mais reduzida nestes locais. São eles:

- Segmento Senhor de Matosinhos – Senhora da Hora;
- Segmento Zona Industrial - Parque da Maia;
- Segmento São Bento – Santo Ovídio.

3.5. RECOLHA DE DADOS

Todos as viagens realizadas são monitorizadas e controladas pelo *Traffic Management System* (TMS), que consiste na gestão em tempo real do tráfego do metropolitano ligeiro do Porto. Este sistema regista todas as passagens antes e depois das estações através de sensores ligados aos circuitos de via, que se encontram conetados com o sistema de semaforização das vias. Segundo Ottaviani e Mazzarello (2011)[15], o objetivo do TMS é executar o plano predefinido o melhor possível, sendo que deteta e resolve conflitos futuros e gera novos planos, alterando horários e explorando rotas alternativas. Poderá ainda dar informações ao agente de condução acerca de velocidades a praticar em certos troços e transmitir-lhe as tais rotas alternativas caso seja necessário.

A recolha de dados dá-se, portanto, com o TMS, que origina bases de dados diárias denominadas de *Timetable Log* (TTLog), contendo informação sobre os horários reais de passagem nos sensores, a hora planeada da mesma e informações sobre a viagem, veículo utilizado e agente de condução. Na figura 9 encontra-se representada uma estação da rede do metro do Porto.

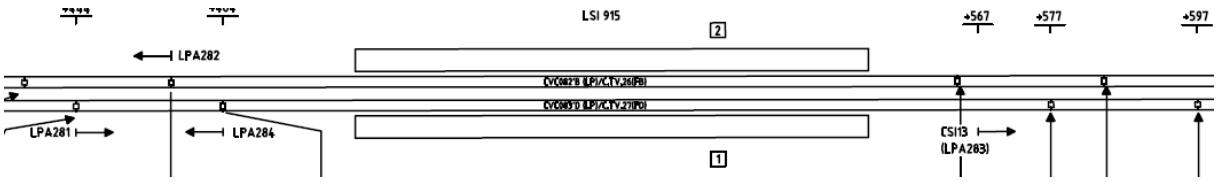


Figura 9 – Esquematização da localização dos sensores em relação aos cais da estação

Os retângulos de maior dimensão representam os cais de embarque e desembarque da estação, enquanto os pequenos quadrados instalados nas vias representam os sensores utilizados para registar as passagens nos circuitos de via e para a sinalização luminosa. Entende-se por circuito de via um segmento que poderá corresponder a uma estação ou troço entre estações, sendo que os seus sensores encontram-se ao longo de todas as linhas e não somente na periferia das estações. É este sistema que fornece os dados para o TMS atuar, pelo que a ocorrência de alguma anomalia no percurso entre estações e a inexistência de circuitos de via nesse troço poderia ter graves consequências.

O valor de medição dos circuitos encontram-se a meio dos sensores, sendo que geralmente estes têm um comprimento de vinte metros. Os tempos são medidos de forma diferente, consoante a posição do veículo relativamente ao cais. O tempo de passagem é medido na dianteira da composição aquando a chegada à estação, contrariamente à partida, na qual o tempo de passagem registado pelo circuito de via

corresponde à passagem da traseira dos veículos. Estes dados vão ser importantes na fase do tratamento de dados, nos quais estes pormenores terão de ser considerados de forma a estimar o acerto entre o momento em que o veículo passa no sensor e o tempo em que realmente arrancou ou parou na estação.

4
METODOLOGIA

4.1. DATA MINING

O termo *data mining*, em português denominado de prospeção de dados, consiste no processo de explorar e organizar grandes quantidades de dados, de forma a obter padrões úteis para análise de variáveis através de métodos computacionais avançados. Estes métodos foram criados a partir da mistura de conhecimentos ao nível da estatística e do desenvolvimento da inteligência artificial e *machine learning*. O *data mining* tem a particularidade de, na sua forma mais pura, não colocar constrangimentos prévios à escolha das variáveis, o que nem sempre garante resultados de interesse para o problema em questão.

O processo de *data mining*, esquematizado na figura 10, compreende sete fases[16], sendo estas:

- limpeza de dados: remoção de anomalias da base de dados a utilizar bem como de dados inconsistentes;
- integração de dados: combinação de variáveis;
- transformação de dados: conversão de uma ou mais variáveis de forma a melhorar a performance da análise a realizar (por exemplo, converter uma variável descrita por símbolos em números);
- processamento dos dados: utilização de métodos analíticos de forma a obter padrões;
- avaliação dos padrões obtidos: identificar os padrões interessantes para o estudo em questão;
- obtenção da informação dada pelos padrões: compreensão dos resultados obtidos e conclusões a serem retiradas.

Como funcionalidades do *data mining* tem-se a caracterização e descriminação de dados, associações e correlações, classificações e regressões, análise de *clusters* e análise de *outliers*. Podem ser classificadas como preditivas ou descritivas.

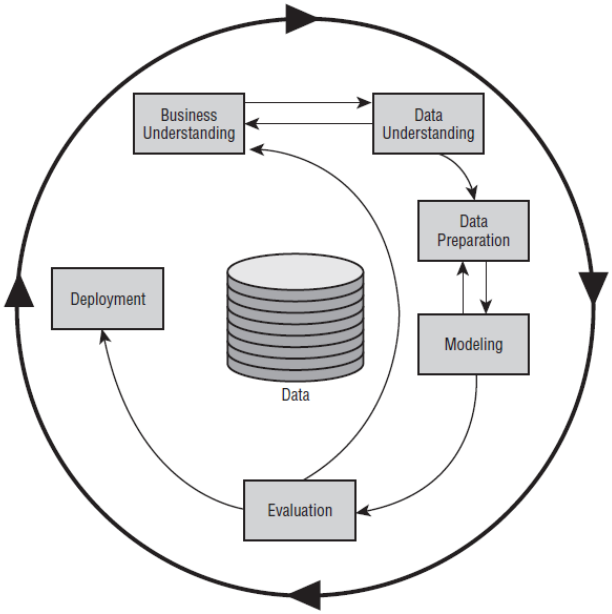


Figura 10 – As diferentes fases do processo de *data mining*

4.2. ORGANIZAÇÃO DA ANÁLISE

O objetivo desta dissertação consiste na avaliação dos fatores possivelmente influentes no incumprimento da pontualidade de serviços afetos a um sistema de transportes ferroviário urbano. Para tal é necessária a aplicação de um procedimento analítico num caso de estudo prático, adaptando as bases de dados criadas para a análise em questão. Graças ao fornecimento de dados por parte da ViaPorto, a análise é realizada para todas as linhas do metropolitano ligeiro da área metropolitana do Porto.

Com base nos indicadores de desempenho representativos da pontualidade e da regularidade de serviços referentes a atrasos acumulados registados no final de cada viagem e às frequências praticadas, respetivamente, divide-se a análise em duas direções:

- Às linhas A, B, C e E associa-se o indicador de desempenho "Atraso" por forma a avaliar o comportamento individual dos serviços bem como das zonas de convergência de vias;
- À linha D, por ser ter maiores frequências e ser independente das restantes, é aplicado o indicador de performance "Dispersão do Intervalo" com o intuito de avaliar a capacidade do serviço em manter os intervalos de passagem planeados.

Para ambos os casos, após o tratamento de dados descrito de seguida, é atribuído um limite de dois minutos para possíveis penalizações, valor arbitrado inferior ao praticado na Europa em comboios devido aos percursos serem mais curtos e as frequências mais elevadas.

Com todas as variáveis originadas e tratadas, é realizada uma análise *cluster* por forma a obter possíveis padrões que agreguem anomalias indutoras de atrasos, atrasos estes que se podem repercutir também a nível dos intervalos de passagem, constituindo-se eventualmente como foco de perturbações e causador de desfasamentos entre viagens consecutivas.

Por motivos práticos e de restrição tecnológica, optou-se por não incorporar todas as quartas-feiras.

4.3. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

O pré-processamento engloba todas as etapas anteriores ao processamento de dados numa análise de *data mining*, e tem como objetivo melhorar a performance do processo. Nesta fase o software utilizado foi o *Microsoft Excel*.

4.3.1. LIMPEZA E TRANSFORMAÇÃO DE DADOS

Na figura 11 encontra-se representado um excerto da base de dados original fornecida pela ViaPorto para a realização desta dissertação.

Actual	Planned	Theoretical	Station	Train	Type	Vehicle1	Vehicle2	Service	Driver
01/03/2018 05:55:25	01/03/2018 05:55:00	01/03/2018 05:55:00	Campanhã	C0900503	D	40		13	354
01/03/2018 05:57:06	01/03/2018 05:57:02	01/03/2018 05:57:02	Heroismo	C0900503	A	40		13	354
01/03/2018 05:58:08	01/03/2018 05:57:22	01/03/2018 05:57:22	Heroismo	C0900503	D	40		13	354
01/03/2018 05:58:22	01/03/2018 05:58:00	01/03/2018 05:58:00	Aeroporto	E4000203	D	32	18	13	134
01/03/2018 05:59:00	01/03/2018 05:58:44	01/03/2018 05:58:44	24 de Ago	C0900503	A	40		13	354
01/03/2018 05:59:30	01/03/2018 05:59:00	01/03/2018 05:59:00	Sr, de Mat	A4800105	D	9		13	186
01/03/2018 05:59:47	01/03/2018 05:59:00	01/03/2018 05:59:00	ISMAI	C9610502	D	121		13	225
01/03/2018 05:59:53	01/03/2018 05:59:04	01/03/2018 05:59:04	24 de Ago	C0900503	D	40		13	354
01/03/2018 06:00:18	01/03/2018 05:59:50	01/03/2018 05:59:50	Botica	E4000203	A	32	18	13	134
01/03/2018 06:00:33	01/03/2018 06:00:00	01/03/2018 06:00:00	Fânzeres	A3000802	D	36		13	255

Figura 11 – Base de dados original de março de 2018

Como se pode observar, a base de dados original consiste em dez colunas:

- *Actual*, *Planned* e *Theoretical*: representam a localização no tempo das passagens;
- *Station*: a estação na qual a passagem foi registada;
- *Train*: o código da viagem na qual a passagem está englobada;
- *Type*: localização do circuito de via relativamente ao cais de embarque e desembarque;
- *Vehicle1* e *Vehicle2*: numeração dos veículos associados à passagem registada;
- *Service*: tipo de serviço;
- *Driver*: código do agente de condução.

A primeira fase do tratamento de dados consiste na eliminação das células desnecessárias. Nas colunas respeitantes às etiquetas temporais das passagens é possível encontrar valores nulos e que não têm qualquer valor para a análise, sendo assim eliminados, reduzindo o número de linhas a analisar em mais de 50%. O mesmo acontece para a coluna *Theoretical*, que por ser equivalente à *Planned* também é suprimida.

Como este estudo prende-se essencialmente com a atividade comercial, os descritores correspondentes à linha Z também são excluídos, eliminando automaticamente pontos da rede registados pelo TMS associados a inversões de marcha e túneis de interligação de linhas nos quais apenas circulam veículos em fora de serviço. Adicionalmente, são filtradas e suprimidas locais registados pelos sensores que não correspondem estações, restando somente aquelas que à data do trabalho são utilizadas diretamente no transporte de passageiros.

Por fim, e para facilitar a análise posterior, a variável *Type* é renomeada para *AD* e transformada numa variável numérica, correspondendo o número 1 à letra A (anterior ao cais) e o algarismo 2 à letra D (posterior ao cais).

4.3.2. INTEGRAÇÃO DE DADOS

Após a fase de limpeza da base de dados, foi necessário proceder à integração de dados, derivando-se outras variáveis relevantes para a análise a partir das representadas com base nos registos das passagens em cada sensor, obtidos pelos TTLogs, e em características da infraestrutura e das viagens em que cada passagem se insere.

Foram obtidas variáveis referentes ao espaço e ao tempo das passagens registadas, bem como a características operacionais e aos indicadores de desempenho a analisar, sendo enumeradas de seguida:

- Etiquetas temporais: identificação de todos os dados associados à data e hora da passagem registada, sendo as mais relevantes as referentes à hora do dia e ao dia de semana;
- Linha: identificação da linha na qual a viagem se insere;
- Sentido de circulação;
- Tipo de veículo;
- Número de veículos;
- Trocas: duas variáveis representativas das trocas de agentes de condução, uma referente ao momento exato na qual esta se dá, a outra com o intuito de informar se na viagem ocorreu uma troca em algum ponto anterior à passagem em análise;
- Anterior atrasado: se o veículo que passou anteriormente seguia atrasado;
- Atraso acumulado: o valor do atraso acumulado num determinado ponto da viagem;
- Atraso acumulado no local anterior;
- Diferença: subtração entre as duas variáveis anteriores, representativa do tempo ganho ou perdido face ao planeado num determinado troço ou estação;
- Diferença entre intervalos de passagem: análise da regularidade do serviço;
- Entropia: se a passagem anterior num dado local foi de um serviço diferente;
- Exclusões: identificação das viagens não contabilizadas para a obtenção dos indicadores de desempenho;
- Variáveis auxiliares.

4.3.2.1. Variáveis Temporais

De forma a retirar a máxima informação da data de passagem, foram criadas sete variáveis descritivas da mesma. São elas:

- Mês;
- Dia;
- Dia da semana;
- Hora;
- Minuto;
- Segundo;
- Tempo.

A variável Tempo corresponde à contabilização dos segundos a partir das 03h00m até à mesma hora do dia seguinte, hora considerada pelo TMS para a separação os dias. É considerada uma variável auxiliar pois permitirá criar restrições aquando da construção de outras variáveis.

4.3.2.2. Variáveis Espaciais

Cabe à variável *AD* distinguir o local relativamente ao cais onde foi registada a passagem. Quando assume o valor 1 está associado ao fim de troço, sendo que o 2 refere-se ao sensor de saída da estação.

Com o intuito de substituir os nomes das estações e, simultaneamente, identificar troços, foi gerado um código com um número de 1 a 164. Para tal, foi necessária a criação de uma tabela auxiliar com as características destes locais relativas às variáveis da base de dados. À mesma tabela auxiliar foi ainda introduzida uma coluna referente à posição do sensor limitador do circuito de via relativamente ao centro do cais da estação associada, e será descrito mais à frente no trabalho.

4.3.2.3. Variáveis associadas a cada viagem

A variável *Train* é formada por um código composto por uma letra, referente à linha da viagem, e um conjunto de sete algarismos. A partir da informação dada por este código, foram criadas duas variáveis, uma referente à linha, de 1 a 5, e a outra ao sentido. A linha F, com origem ou destino na estação Fânzeres, é servida por veículos oriundos das linhas A e E. Por isso, a linha F corresponde a uma designação meramente comercial que, em termos operacionais, acaba por estar incluída no serviço oferecido pelas outras duas linhas. Relativamente ao sentido, foi arbitrado o valor 1 para uma viagem que circule de Norte para Sul, isto é, para as linhas A, B, C e E de fora da cidade do Porto para o centro ou Fânzeres. O algarismo 2 refere-se ao sentido oposto.

Com o intuito de avaliar o impacto do material circulante na pontualidade, foi considerado o número e tipo de veículos associado a cada viagem. Sabendo que os veículos *Tram-Train* apenas circulam nas linhas B e C, para estes o seu valor é 2, enquanto para as restantes linhas o número atribuído é o 1, associado ao *Eurotram*. Foi necessária a separação relativamente ao tipo de veículo devido às suas diferentes características técnicas.

Por último, foram introduzidas duas variáveis binomiais referentes a trocas de agentes de condução, uma identificadora do ponto da rede em que ocorre este acontecimento e a segunda que informa se numa dada viagem houve uma troca num local anterior. O objetivo destas variáveis consiste em identificar se aqueles serviços não pontuais poderão ter tido como perturbação ao horário planeado a troca de agentes de condução.

4.3.2.4. Variáveis relativas ao indicador “Atraso”

Na análise a este indicador de desempenho é importante saber qual a distância que um veículo percorre desde o momento em que a sua passagem é captada até ao ponto onde se encontra parado. Admitindo que quando o veículo atinge o estado de repouso numa dada estação o centro do cais se encontra exatamente alinhado com o ponto médio da composição, e que esta descreve um movimento uniformemente acelerado, é possível calcular o intervalo de tempo entre aquele que é registado de chegada e o tempo em que realmente parou na estação.

Foi, então, necessário verificar as distâncias de todos os circuitos de via de todas estações da rede, originando-se uma nova tabela. Esta tabela auxiliar inclui as posições relativas do circuito de via respeitante à estação associada, ao sentido no qual os veículos se deslocam ao passar pelo sensor, e se representa a chegada ou a saída da estação, sendo esta última equivalente à variável AD da base de dados. Com estes dados foi igualmente formada a tabela anterior relativa à introdução dos códigos referentes a troços e estações, pelo que é transitada a coluna das distâncias para a primeira tabela auxiliar (figura 12). De seguida, foi associada a cada passagem da base de dados a distância entre o centro do cais e o ponto médio do sensor acionado no registo, originando-se assim a variável correspondente à distância ao sensor, *Dist CV*.

TT LOG	Código Est	Conc.	Código	Dist CV
24 de Agosto	1	111	38	46
Aeroporto	2	121	39	70
Aliados	3	211	40	46
Alto da Pêga	4	221	39	70
Araújo	5	122	133	40
Árvore	6	212	132	40
Azurara	7	113	149	50

Figura 12 – Tabela auxiliar relativa aos códigos das estações e da distância do sensor ao centro do cais

Tal como mencionado no capítulo 3, o registo das passagens é distinto consoante o movimento do veículo relativamente à estação. No instante de registo num circuito de via associado à entrada no cais de embarque, a passagem é capturada aquando a passagem da dianteira da composição no sensor. Por sua vez, o momento de registo associado à saída da estação coincide com a passagem da traseira da composição no sensor. Tendo em conta que as distâncias anteriormente registadas têm em conta o centro do cais, será necessário adicionar a distância adicional percorrida pelos respetivos extremos do material circulante.

Desta forma tem-se que a distância total percorrida pela dianteira da composição entre o circuito de via localizado à entrada e o centro do cais (d_c) e a distância total percorrida pela traseira da composição entre o sensor situado à saída da estação e o centro do cais (d_p) são dadas pelas equações 4.1 e 4.2, respetivamente.

$$d_c = d'_c + {}^{l}/_{2} \tag{4.1}$$

$$d_p = d'_p + {}^{l}/_{2} \tag{4.2}$$

Em que:

- d'_c é a distância entre o sensor de entrada e o centro do cais;
- d'_p é a distância entre o centro do cais e o sensor de saída;
- l é o comprimento da composição.

O comprimento da composição, l, varia apenas consoante a quantidade de veículos associados à viagem registada. Como os valores de comprimento do *Eurotram* e do *Tram-Train* são semelhantes, 35m e 37m respetivamente, foi considerado o seu valor médio, ou seja, 36m.

Por último, com o intuito de proceder a um acerto do horário registado para o horário real de chegada e partida ao cais, foi originada uma última variável auxiliar. Esta representa as acelerações médias dos veículos e foram obtidas através das características técnicas do material circulante fornecidas pela ViaPorto. As respeitantes ao *Tram-Train* são discriminadas na sua ficha técnica, contudo as acelerações/desacelerações médias referentes aos veículos *Eurotram* tiveram que ser estimadas através dos diagramas de velocidades fornecidos que revelam acelerações/desacelerações aproximadamente constantes. Tomaram-se os seguintes valores de acelerações (a) e desacelerações (d):

- *Eurotram*: a = 0,69 m/s^2 e d = 0,49 m/s^2;

- *Tram-train*: a = 0,43 m/s^2 e d = 1,23 m/s^2.

Com estes dados, tem-se todos os requisitos para aplicar a lei de movimento uniformemente acelerado, enunciada na Equação 4.3.

$$x = x_o + v_o t + {}^1\!/_2\, a t^2 \tag{4.3.}$$

Considerando x_o e v_o, posição e velocidade inicial respetivamente, igual a zero partindo do pressuposto que o veículo parte do ponto central do cais do estado de repouso, simplifica-se para a seguinte Equação 4.4.:

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a}} \tag{4.4.}$$

Substituindo as incógnitas pelos dados deste trabalho,

$$\Delta t_c = \sqrt{\frac{2d_c}{d}} \tag{4.5}$$

$$\Delta t_p = \sqrt{\frac{2d_p}{a}} \tag{4.6}$$

Em que,

- Δt_c é a correção do horário praticado à chegada;
- Δt_p é a correção do horário praticado à partida;
- a é a aceleração média do veículo;
- d é a desaceleração média do veículo.

Por fim, a conversão do horário medido nos sensores para o horário estimado de chegada (t_c) e partida (t_p) do cais é dada pelas Equações 4.7 e 4.8:

$$t_c = t'_c + \Delta t_c \tag{4.7}$$

$$t_p = t'_p - \Delta t_p \tag{4.8}$$

Em que,

- t'_c é o instante de tempo registado pela passagem da dianteira da composição pelo circuito de via de entrada na estação;

- *t'_p* é o instante de tempo registado pela passagem da traseira da composição pelo circuito de via de saída da estação.

De realçar que t_c e t_p se referem à coluna *Real* da base de dados, t'_c e t'_p à variável *Actual* e Δt_c e Δt_p à variável *Acerto*.

Após o cálculo dos horários reais de chegada e partida é possível quantificar a sua variação comparativamente aos horários planeados. De forma a avaliar a pontualidade segundo o indicador de desempenho "Atraso", arbitra-se os dois minutos referidos anteriormente como valor limite da tolerância.

Com o objetivo de representar o indicador de desempenho em análise foram originadas três variáveis representativas do mesmo. A primeira retrata o atraso acumulado de uma viagem aquando o registo de uma dada passagem, sendo calculada através da diferença entre o horário real estimado e o horário planeado. A segunda é idêntica à primeira, representando o atraso acumulado no local anterior dessa dada passagem. A última constitui-se como a diferença entre as anteriores, permitindo a identificação das estações ou troços que se assumem como maior foco de perturbações induzidas no sistema. Estas variáveis podem ser observadas na figura 13.

Atraso	Atraso Ant	Diferença
19	0	19
22	19	3
36	22	14
33	36	-3
43	33	10
33	43	-10
35	33	1
40	35	6
49	40	9

Figura 13 – Variáveis representativas do indicador de desempenho "Atraso"

4.3.2.5. Variáveis relativas ao indicador "Dispersão do Intervalo"

Para a linha D testa-se a análise de um indicador de desempenho distinto, relacionado com a regularidade dos serviços, aproveitando o facto de esta linha não partilhar o canal com as restantes. Este indicador prende-se essencialmente com a manutenção da frequência ao longo da linha ou, por outras palavras, avalia a qualidade dos serviços em manterem os mesmos intervalos de passagem entre si.

A correção aos horários estimada no subcapítulo anterior não é utilizada para a análise de frequências, dado que a localização a que se reportam os registos não é relevante, desde que se mantenha para todas as viagens realizadas. Logo, as passagens registadas diretamente pelos sensores são exatas, pelo que a variável utilizada será a *Actual* e não a *Real*.

Em termos de formulação do problema, foram criadas três variáveis:

- *Intervalo teórico*: valores de intervalos teóricos de passagens consecutivas num mesmo local da rede, segundo a variável *Planned*;
- *Intervalo observado*: valores de intervalos de passagem praticados em concordância com a variável teórica;
- *Dispersão*: diferença entre os intervalos observado e teórico.

Para tal, foi necessário uma reordenação da base de dados segundo o sentido de passagem, estação ou troço, e horário de passagem. É possível observar na figura 14 a disposição das variáveis.

Int Teórico	Int Observ	Dispersão	Pen +	Pen -
360	409	49	0	0
360	250	-110	0	0
360	366	6	0	0
360	458	98	0	0
360	417	57	0	0
360	372	12	0	0
360	440	80	0	0
360	384	24	0	0
360	415	55	0	0

Figura 14 - Variáveis representativas do indicador de desempenho “Dispersão do Intervalo”

Atenta-se também a existência de duas variáveis adicionais, *Pen* + e *Pen* -, que identificam se as passagens ultrapassam o limite estipulado positivamente ou negativamente, ou seja, se as passagens consecutivas se aproximam ou se distanciam do serviço seguinte, respetivamente. Para este indicador de performance operacional entendeu-se utilizar o mesmo limite do indicador de desempenho anteriormente retratado, fixando-se nos 120 segundos, para atraso e adianto.

4.4. ANÁLISE DE *CLUSTERS*

A análise de *clusters* é um processo de *data mining* no qual os resultados obtidos apresentam-se sob a forma de agrupamentos de dados, ou *clusters*. Estes agrupamentos são caracterizados pela semelhança das observações contidas em cada um destes, sendo que todos os *clusters* possuem características diferentes entre si. A sua obtenção serve essencialmente para identificar padrões em grandes quantidades de dados, providenciando uma melhor compreensão da informação contida na base de dados e do que esta representa. Existem dois grandes métodos de análise de *clusters*, o hierárquico e o não hierárquico.

O método hierárquico tem como principal característica a utilização de um algoritmo ao qual são fornecidas várias partições possíveis e uma vez que uma observação é agrupada com outras, não mais pode trocar de *cluster*. Os métodos hierárquicos podem ser diferenciados segundo métodos aglomerativos ou divisivos, sendo que os seus *outputs* serão em forma de dendogramas.

Nos métodos não hierárquicos, é necessário definir a quantidade de *clusters* que se pretende obter, sendo que uma análise deste tipo deverá ser sempre realizada de forma crescente de formação de agrupamentos, interrompendo-se as iterações quando os critérios de paragem escolhidos assim o definirem. Os dados podem-se mover entre *clusters* consoante as semelhanças/dissemelhanças criadas à medida que se aumentam os agrupamentos desejados. Os métodos não hierárquicos são, geralmente, mais eficientes na análise de bases de dados com elevados números de observações.

Desta forma, com o objetivo de analisar os dados referentes às passagens realizadas e tratadas para este trabalho, procedeu-se à utilização de um método não hierárquico, o k-médias, que minimiza a soma de todas as distâncias euclidianas entre cada observação e o centróide do *cluster* a que esta pertence segundo o método dos mínimos quadrados. Este algoritmo foi corrido de forma crescente de formação de agrupamentos, sendo que foram utilizados como critérios de paragem a estabilização do parâmetro de Davies-Bouldin e a classificação progressiva de *outliers* em *clusters* com pouco peso no conjunto

total da amostra. Um *outlier* considera-se como uma observação que apresenta um grande afastamento relativamente às restantes da base de dados, sendo assim considerado como pouco representativo da amostra.

Para a realização desta análise *cluster* foi utilizado o software *RapidMiner*, uma plataforma de *data mining* e análise preditiva utilizando processos de *machine learning*. Foi desenhado com o intuito de analisar grandes quantidades de dados, daí a sua aplicação no presente trabalho, e tem como principal objetivo a rápida criação de processos de análise.

Este software é dividido em três produtos, dos quais é apenas utilizado o *RapidMiner Studio*. Tem como principal vantagem uma disposição gráfica de todo o processo, propiciando uma fácil e intuitiva interação e rápida personalização de acordo com o objeto de estudo.

4.4.1. CRIAÇÃO DO PROCESSO NO RAPIDMINER

O processo originado para se proceder a esta análise no software foi sofrendo pequenas alterações ao longo do estudo. Na figura 15 pode-se observar o processo base no qual foram obtidos os resultados demonstrados no próximo capítulo.

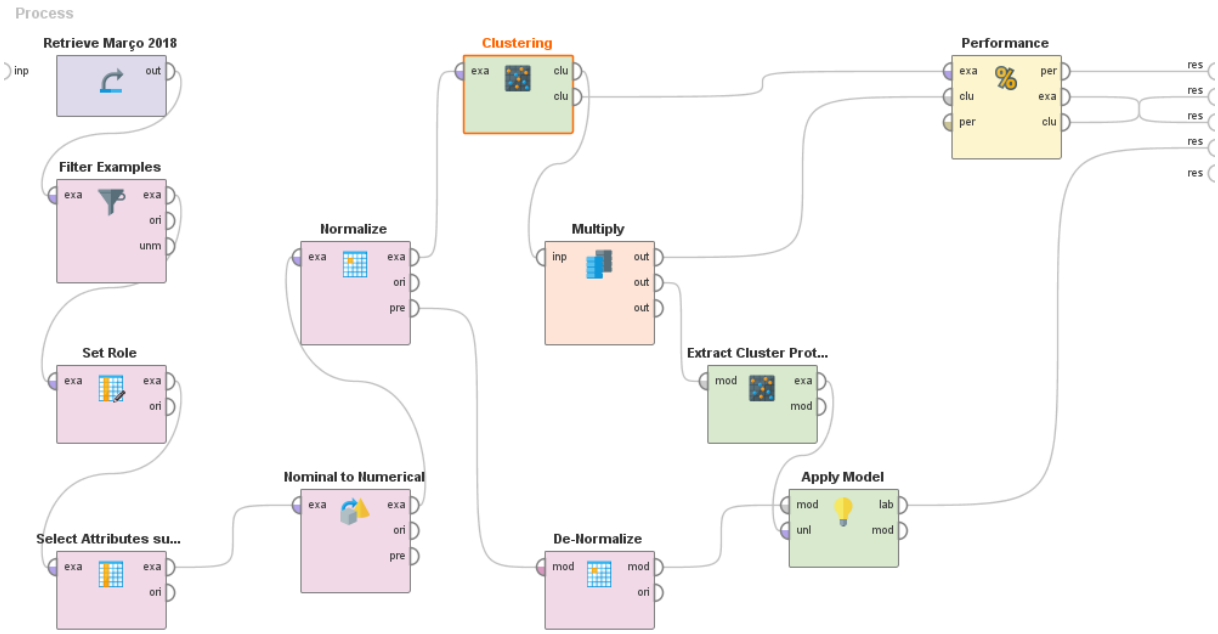


Figura 15 – Processo utilizado no software *RapidMiner*

Como se pode observar, a interface gráfica do software possibilita uma boa compreensão de todo o processo e possibilita uma fácil alteração do mesmo devido à representação por meio de sistemas em ramos dos operadores. Chama-se operador a cada caixa introduzida, cada um com a sua função, dependendo ainda das ligações a nível do *input* e do *output*.

Os operadores utilizados foram:

- *Retrieve Database*: após a importação da base de dados tratada e de definir as características das variáveis, esta é introduzida no processo como seu ponto de partida;
- *Filter Examples*: este operador serve, como o nome indica, para filtrar observações em função de valores de variáveis presentes na base de dados. Neste caso, serve para deixar de parte da análise as passagens de viagens associadas a exclusões;
- *Set Role*: tem como função considerar uma variável como identificadora (*label*) das passagens;
- *Select Attributes*: seleção das variáveis a processar;
- *Nominal to Numerical*: conversão das variáveis nominais selecionadas em numéricas;
- *Normalize*: normalização das variáveis numéricas selecionadas;
- *Clustering*: processo de análise *cluster*, definido como não hierárquico e seguindo o algoritmo k-médias;
- *Multiply*: operador auxiliar, com o intuito de copiar o *output* do operador *Clustering* e permitir criar dois ramos distintos;
- *Extract Cluster Prototype*: este operador gera um *Example Set* com a informação recebida após a clusterização, ou seja, cria uma tabela que demonstra os padrões obtidos associados a cada *cluster*;
- *De-Normalize:* desnormalização das variáveis numéricas;
- *Apply Model*: operador que reúne a informação transmitida pela análise *cluster* e pela classificação das variáveis. Permite que a leitura do *Example Set* seja mais eficiente após a desnomalização das variáveis presentes no mesmo;
- *Performance*: operador utilizado para três diferentes fins. Por ordem descendente dos *outputs* associados:
    - O *performance vector* (per) produz a qualidade da análise segundo o parâmetro escolhido, neste caso o Índice de Davies-Bouldin;
    - O *example set* (exa) origina uma nova tabela, desta feita com os valores normalizados;
    - O *cluster model* (clu) exporta a informação sobre os centróides dos *clusters* originados, possibilitando inclusivamente a sua visualização gráfica, e apresenta uma lista na qual estão presentes todas as observações (passagens) consideradas na análise, representadas pela variável de identificação introduzida, e os agrupamentos nos quais se inseriram.

4.4.2. VARIÁVEIS ANALISADAS

A primeira condição introduzida na análise foi a filtragem dos valores associados a viagens alvo de exclusão, de forma a que as passagens destas viagens não influenciem a criação e *clusters* devido aos seus comportamentos anormais.

De seguida, foi utilizada a variável *id* como variável identificadora de cada passagem através de um número distinto para todas as observações em cada mês. Esta variável foi adicionada às bases de dados, contabilizando de 1 a *x* as passagens por ordem crescente temporal, sendo *x* o número de identificação da última passagem do mês.

Quanto às variáveis selecionadas para serem corridas na análise de *clusters*, numa primeira fase foram introduzidos os valores associados a estações/troços, dia da semana, hora, linha, número e tipo de veículos e as variáveis representativas do indicador de desempenho "Atraso". No entanto, devido à natureza da maioria destas variáveis ser polinomial, a leitura dos resultados obtidos revelou-se pouco clara. Desta forma, numa segunda fase testou-se a inclusão apenas das variáveis referentes aos atrasos acumulados, no local e no ponto anterior da viagem, a diferença entre ambos e a variável identificadora de troço ou estação *AD*. Os resultados obtidos serão apresentados e analisados no capítulo seguinte.

Relativamente ao indicador de desempenho "Dispersão do Intervalo", foram testadas várias combinações de variáveis, contudo os resultados não se revelaram conclusivos sobre as tendências das perturbações à operação.

4.4.3. TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS PARA O EXCEL

Realizada a análise *cluster*, foi necessário transportar os resultados obtidos para as folhas de cálculo correspondentes às bases de dados utilizadas. O objetivo principal desta transposição consiste na associação da informação sobre o *cluster* a que cada passagem da base de dados corresponde. Por conseguinte, foi utilizada a listagem composta pela identificação das passagem e do agrupamento correspondente, separadando-se posteriormente as passagens relativas a *clusters* distintos para serem estudados separadamente.

5
ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISE DO INDICADOR DE DESEMPENHO "ATRASO"

5.1.1. ANÁLISE DE *CLUSTERS*

Os padrões obtidos revelaram-se semelhantes para os meses analisados, de março a agosto de 2018, sendo que o número de *clusters* finais foi idêntico para quase todas as amostras. Na tabela 1 pode-se observar a disposição dos agrupamentos para o mês de março, consierado como mês de referência nesta análise, e as médias das variáveis em cada *cluster*, bem como a distribuição segundo a variável nominal *AD* (identificação de troço ou estação). Foi também calculada a representatividade dos agrupamentos relativamente ao total da amostra.

Tabela 1 - Centróides e representatividade dos clusters dos desajustes de horário (março de 2018)

Cluster	Atraso/ Adianto acumulado no local (s)	Atraso/ Adianto acumulado no local anterior (s)	Atraso/ Adianto no local (s)	Estação	Troço	Representatividade na amostra mensal (%)
0	5	9	-3	1,00	0,00	30,8
1	9	6	4	0,00	1,00	30,3
2	166	164	1	0,49	0,51	6,1
3	77	3	74	0,44	0,56	0,9
4	67	71	-4	1,00	0,00	15,5
5	382	378	4	0,48	0,52	0,7
6	71	66	5	0,00	1,00	15,7
7	3579	-4208	7787	0,67	0,33	0,0
				Total de passagens		964.405

Os *clusters* originados relativamente ao mês retratado podem ser interpretados da seguinte forma:

- *Cluster* 0: passagens com pequenos atrasos acumulados e pequenas recuperações locais em estações;
- *Cluster* 1: passagens com pequenos atrasos acumulados e pequenos atrasos locais em troços;
- *Cluster* 2: passagens com elevados atrasos acumulados e pequenos atrasos locais, distribuídos por troços e estações;
- *Cluster* 3: passagens com moderados atrasos acumulados e grandes atrasos locais, distribuídos por troços e estações;
- *Cluster* 4: passagens com moderados atrasos acumulados e pequenas recuperações locais em estações;
- *Cluster* 5: passagens com atrasos acumulados muito elevados e pequenos atrasos locais, distribuídos por troços e estações;
- *Cluster* 6: passagens com moderados atrasos acumulados e pequenos atrasos locais em troços;
- *Cluster* 7: agrupamento de *outliers*.

Os *clusters* 0 e 1 representam cerca de 61% da amostra total do mês de março e correspondem ao normal funcionamento do serviço, sem grandes perturbações. Contudo, é de notar que as recuperações de tempo se dão em estações, enquanto que os pequenos atrasos locais ocorrem em troços entre as mesmas. Este padrão sobressai novamente quando se atentam aos *clusters* 4 e 5, onde os atrasos locais são moderados mas as variações locais são reduzidas. A junção destes dois aglomerados reúne praticamente toda a amostra, à exceção dos elevados e muito elevados atrasos acumulados, aproximadamente 7%, e dos elevados atrasos localizados, cerca de 1%.

É este último *cluster*, o número 3 da tabela 1, que suscita um maior interesse de análise, visto que deteta a introdução de perturbações ao normal funcionamento do serviço. É caracterizado por uma perda localizada média de 74 segundos e um atraso acumulado médio no local anterior de 3 segundos, o que poderá indicar que a ocorrência destas perturbações se dá, na sua maioria, em troços ou estações na fase inicial da viagem. Apesar de representar apenas quase 1% do total de passagens do mês, das viagens que finalizam os seus respetivos serviços com mais de 120 segundos de atraso acumulado, 68,4% têm uma ou mais passagens que se encontram neste *cluster*. Estes dados podem ser obervados na tabela 5.6.

Os resultados da análise de *clusters* para este mês são semelhantes ao dos restantes meses em análise, que podem ser consultados das tabelas 2 a 5. Não são apresentados os resultados do mês de junho visto que da sua análise não resultou um agrupamento de passagens correspondentes a perdas localizadas. Nestas tabelas é possível observar que o intervalo de perdas de tempo localizadas médias varia entre os 37 e os 47 segundos, valores abaixo do demonstrado para o mês de março. Contudo, a percentagem média de viagens que terminam o serviço com mais de 120 segundos e que possuem pelo menos uma passagem incluída nestes *clusters* alterna entre os 74% e os 92%, acima dos verificados para o mês de referência. A ocorrência destas perturbações ocorrem predominantemente em troços entre estações, sendo que o mês de julho de 2018 constitui-se como o único em que este dado não se verifica, 47% em troços e 53% em estações. Esta propensão do comportamento das perdas localizadas ocorrerem maioritariamente entre paragens, aliado ao facto de as recuperações de tempo se darem em estações, induz que os elevados atrasos acumulados não são provocados por aumentos de procura.

Relativamente à tabela 6, a percentagem demonstrada refere-se ao quociente entre a contagem de códigos descritores de viagens distintos contidos nos *clusters* e os referentes às viagens que chegaram ao destino com atraso acumulado acima do limite.

Tabela 2 - Centróides e representatividade dos *clusters* dos desajustes de horário (abril de 2018)

Cluster	**Atraso/ Adianto acumulado no local (s)**	**Atraso/ Adianto acumulado no local anterior (s)**	**Atraso/ Adianto no local (s)**	**Estação**	**Troço**	**Representatividade na amostra mensal (%)**
0	76	73	4	0,00	1,00	14,2
1	71	75	-4	1,00	0,00	14,8
2	9	7	2	0,00	1,00	30,0
3	184	183	2	0,49	0,51	4,7
4	525	518	6	0,49	0,51	0,4
5	6	10	-4	1,00	0,00	31,5
6	13	-2898	2911	1,00	0,00	0,0
7	49	12	37	0,27	0,73	4,3
				Total de passagens		843.113

Tabela 3 - Centróides e representatividade dos *clusters* dos desajustes de horário (maio de 2018)

Cluster	**Atraso/ Adianto acumulado no local (s)**	**Atraso/ Adianto acumulado no local anterior (s)**	**Atraso/ Adianto no local (s)**	**Estação**	**Troço**	**Representatividade na amostra mensal (%)**
0	5140	5131	9	0,48	0,52	0,0
1	199	196	3	0,38	0,62	3,8
2	61	14	47	0,17	0,83	2,8
3	101	104	-3	1,00	0,00	8,8
4	0	0	0	1,00	0,00	21,2
5	82	78	4	0,00	1,00	14,5
6	3007	-3508	6515	0,83	0,17	0,0
7	459	457	2	0,49	0,51	0,5
8	11	9	2	0,00	1,00	30,6
9	36	43	-8	1,00	0,00	17,8
				Total de passagens		870.296

Tabela 4 - Centróides e representatividade dos *clusters* dos desajustes de horário (julho de 2018)

Cluster	**Atraso/ Adianto acumulado no local (s)**	**Atraso/ Adianto acumulado no local anterior (s)**	**Atraso/ Adianto no local (s)**	**Estação**	**Troço**	**Representatividade na amostra mensal (%)**
0	7	5	2	0,00	1,00	29,7
1	4	7	-3	1,00	0,00	30,3
2	65	68	-3	1,00	0,00	15,2
3	474	471	3	0,48	0,52	0,4
4	166	164	2	0,47	0,53	5,2
5	214	-17	231	0,88	0,12	0,1
6	49	5	43	0,53	0,47	3,3
7	69	65	4	0,00	1,00	15,7
				Total de passagens		949.390

Tabela 5 - Centróides e representatividade dos *clusters* dos desajustes de horário (agosto de 2018)

Cluster	**Atraso/ Adianto acumulado no local (s)**	**Atraso/ Adianto acumulado no local anterior (s)**	**Atraso/ Adianto no local (s)**	**Estação**	**Troço**	**Representatividade na amostra mensal (%)**
0	22	25	-3	1,00	0,00	46,0
1	190	191	-1	0,70	0,30	4,6
2	4802	-3081	7883	0,75	0,25	0,0
3	79	75	4	0,00	1,00	14,1
4	49	14	35	0,19	0,81	3,8
5	8	7	2	0,00	1,00	31,4
				Total de passagens		962.495

Tabela 6 - Representatividade dos atrasos locais elevados nas viagens com atrasos acumulados ≥ 120 segundos

Mês	**N.º de viagens ≥ 120s de atraso acumulado (excluindo quartas-feiras)**	**Percentagem de viagens ≥ 120s identificadas no *cluster* de atrasos locais elevados**
Março 2018	2.363	68,4
Abril 2018	1.943	92,1
Maio 2018	2.278	82,8
Julho 2018	1.943	74,3
Agosto 2018	1.841	86,1
Março 2018 – Agosto 2018	10.368	80,7

5.1.2. Distribuição Espacial dos Elevados Atrasos Locais

Através dos resultados obtidos no subcapítulo anterior, foi percetível a contribuição dos grandes atrasos locais na pontualidade dos serviços. Com vista a complementar essa análise, procedeu-se à avaliação das restantes variáveis da base de dados relativamente às passagens isoladas pelo *cluster* das perdas localizadas. De forma a perceber quais as possíveis causas da ocorrência deste fenómeno em troços e estações, foi estudada a sua distribuição espacial.

Numa primeira fase, analisou-se a ocorrência dos atrasos locais nas diferentes linhas operacionais. Observando a tabela 7, é possível inferir que a maioria destes atrasos locais não deverá ocorrer no segmento considerado como "tronco comum", tal a disparidade do número de passagens por viagens nos *clusters* relativos às perdas localizadas. Ao longo do período total considerado, na linha A, em cada viagem que está presente neste agrupamento estão associados, em média, quase quatro passagens com atraso local elevado contrastando com as restantes linhas, onde cada viagem possui uma ou duas passagens por viagem.

Tabela 7 - Distribuição por linha dos atrasos locais elevados

Linha	***Clusters* de atrasos locais elevados**			**N.º de total de viagens (exceto quartas-feiras)**
	N.º de passagens	**N.º de viagens**	**Passagens/Viagem**	
A	69.269	18.081	3,8	23.753
B	19.184	9.217	2,1	16.052
C	9.209	7.094	1,3	16.205
E	8.917	6.097	1,5	10.579

Numa segunda fase, procedeu-se à análise espacial ao longo das linhas para verificar se as perdas localizadas ocorrem em locais específicos ou se são igualmente distribuídas pela extensão dos diferentes serviços. Em cada uma das figuras 16 a 23 estão representados dois gráficos para o mês de março, o superior relativo à distruibuição das passagens contidas no *cluster* e o inferior relativo à evolução das passagens com um atraso acumulado superior a 120 segundos ao longo dos percursos.

No gráfico dos atrasos locais elevados tem-se o número total de passagens incorporadas no *cluster* (barras cor-de-laranja) bem como a quantidade dessas passagens que ultrapassa os dois minutos limite no final do seu percurso (barras azuis). No gráfico inferior encontra-se representado o número total de passagens com atrasos acumulados superiores a 120 segundos (barras cor-de-laranja) e aquelas pertencentes a viagens que no final ultrapassam esse limite (barras azuis). A variação das barras a cor-de-laranja ao longo dos percursos traduz a quantidade de viagens que conseguiu recuperar o atraso acumulado que num dado ponto da rede teria em excesso. De referir ainda que, nas estações de destino, existe uma variação entre ambas as barras, visto que para estes locais foram atribuídos os valores de correção entre sensor e centro de cais disponibilizados, distintos dos obtidos analiticamente e especificados no capítulo anterior. Os gráficos referentes ao restantes meses em análise encontram-se representados no Anexo A1, à exceção do mês de junho, no qual não foi possível identificar o *cluster* de elevados atrasos locais. O comportamento nos restantes meses é semelhante ao mês de março, apresentando valores de perdas locais mais elevados, indo de encontro ao referido no subcapítulo anterior.

Observando os gráficos relativos à linha A (figuras 16, 17 e A1.1 a A1.8) verifica-se que a grande maioria dos elevados atrasos locais nesta linha ocorre no segmento Senhor de Matosinhos – Senhora da Hora. Tendo em conta o elevado número de passagens afetadas, especialmente nos meses apresentados em anexo, é possível concluir que a ocorrência deste fenómeno nestes locais é algo sistemático. A origem dos mesmos estará relacionada com o incumprimento das velocidades de circulação previstas na realização do horário, visto que as perdas localizadas se dão principalmente em troços entre estações. Na base deste incumprimento poderá estar a interação do metropolitano ligeiro com o restante tráfego, uma vez que existem várias interseções de nível neste segmento, conforme referido na caracterização da rede. Um aumento de tráfego da zona não relacionado com o metro e a não atualização do horário consoante este incremento de movimentações poderá ser a causa principal do problema.

O comportamento das restantes linhas é semelhante entre si, sendo que os grandes atrasos locais no segmento Fonte do Cuco – Senhora da Hora é constante em todos os gráficos. Este segmento corresponde a duas zonas de convergência de linhas e, agregando o facto de a linha A conter um elevado número de atrasos acumulados que são transferidos para o tronco comum, é expectável que as perdas locais nas linhas B, C e E nos locais supramencionados sejam causadas pela repercussão desses atrasos acumulados.

É ainda visível nos gráficos superiores os atrasos locais associados a estações de início de serviço e nas imediações da Trindade Superior e do Fórum da Maia. Os atrasos na partida das viagens poderá refletir atrasos de grande relevo no sentido oposto e em que o tempo de suporte não é suficiente para combater tal circunstância, especialmente naqueles em que estes tempos de terminal são mais reduzidos. O efeito provocado na Trindade Superior será possívelmente o único a ser explicado pela procura, visto ser o ponto central da rede de metro. É possível que no troço Lapa – Trindade o atraso local seja maior que no troço Bolhão – Trindade, ambos no sentido de acesso à estação em comum, devido ao traçado em planta do primeiro, no qual consta com uma curva de raio reduzido e, portanto, a velocidade de circulação também será menor. Todavia, havendo atrasos locais nos dois sentidos de acesso à Trindade, a elevada procura e a entropia do sistema serão a base principal para este fenómeno. Relativamente às imediações do Fórum da Maia, o motivo pelo qual poderão dar-se as perdas localizadas será o mesmo do segmento Senhor de Matosinhos – Senhora da Hora, pois são troços à superfície sujeitos a interações com o tráfego rodoviário e pedonal. No entanto, a preponderância dos terminais e das estações enunciadas na ocorrência de elevados atrasos locais é reduzida comparativamente aos segmentos identificados da linha A e das zonas de convergência.

Relacionando ambos os gráficos, verifica-se ainda que as elevadas perdas locais têm influência não só nos atrasos acumulados no próprio local mas também nos locais posteriores.

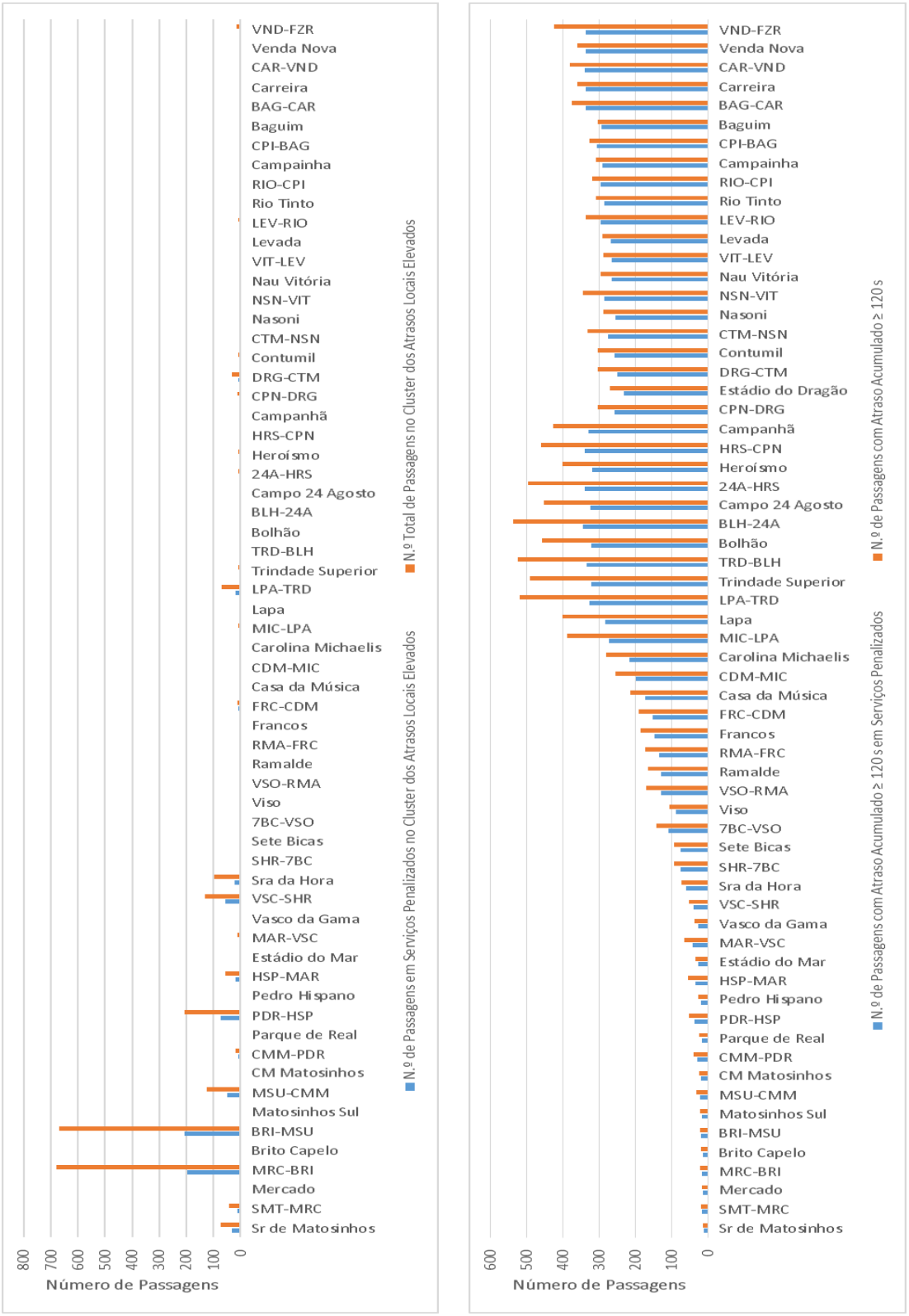


Figura 16 - Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (março de 2018, exceto quartas-feiras)

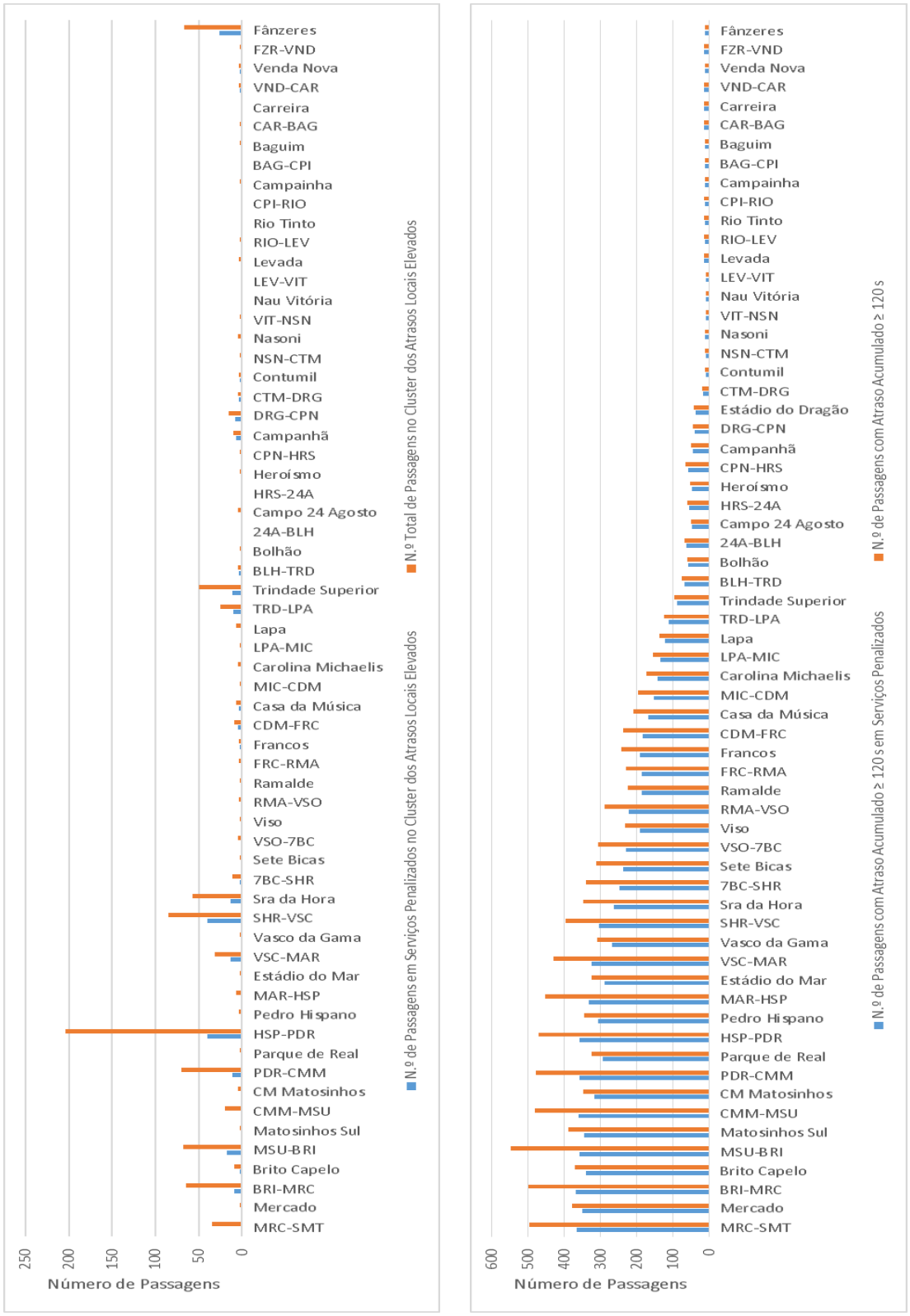


Figura 17 - Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres - Senhor de Matosinhos (março de 2018, exceto quartas-feiras)

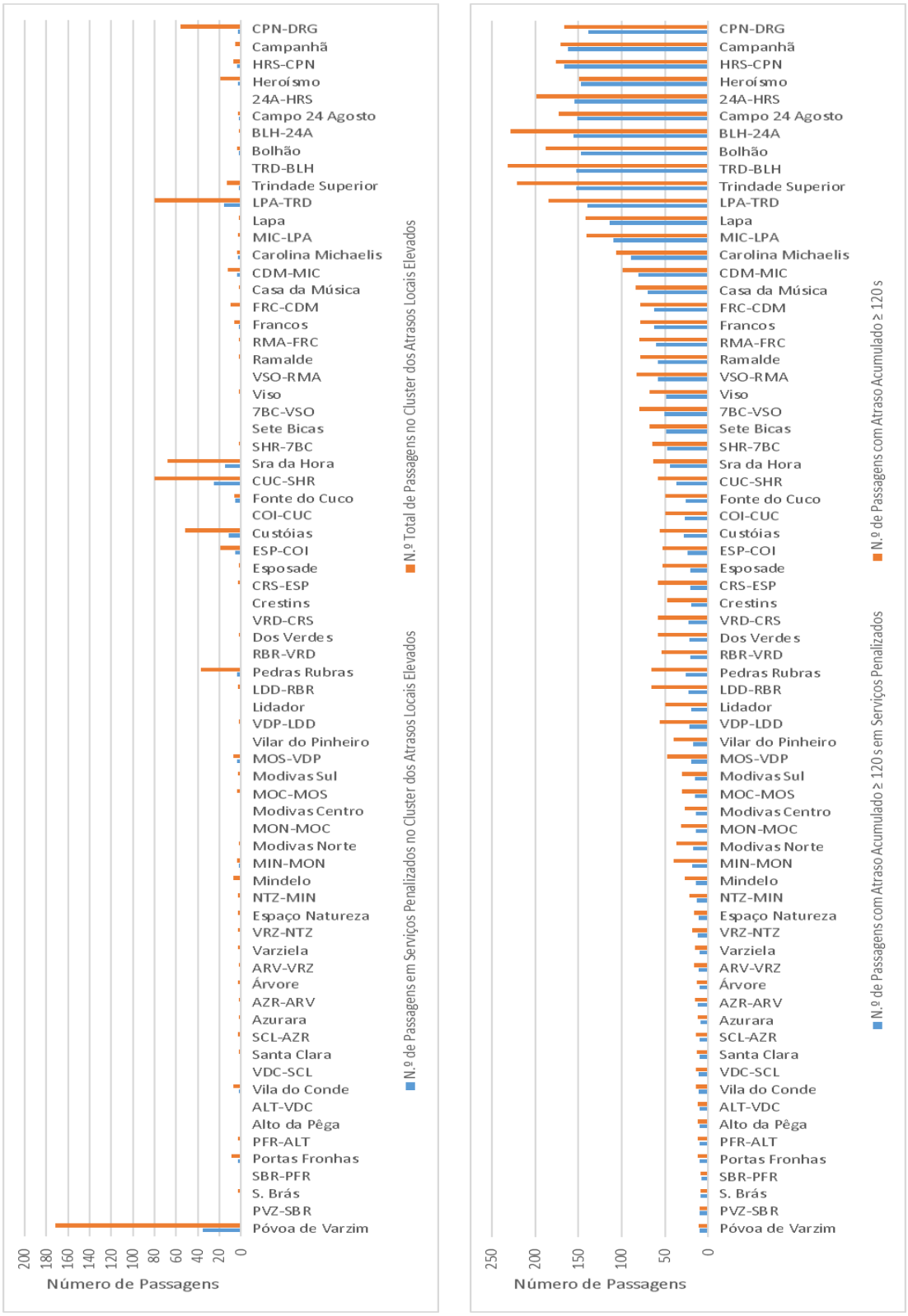


Figura 18 - Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa de Varzim – Estádio do Dragão (março de 2018, exceto quartas-feiras)

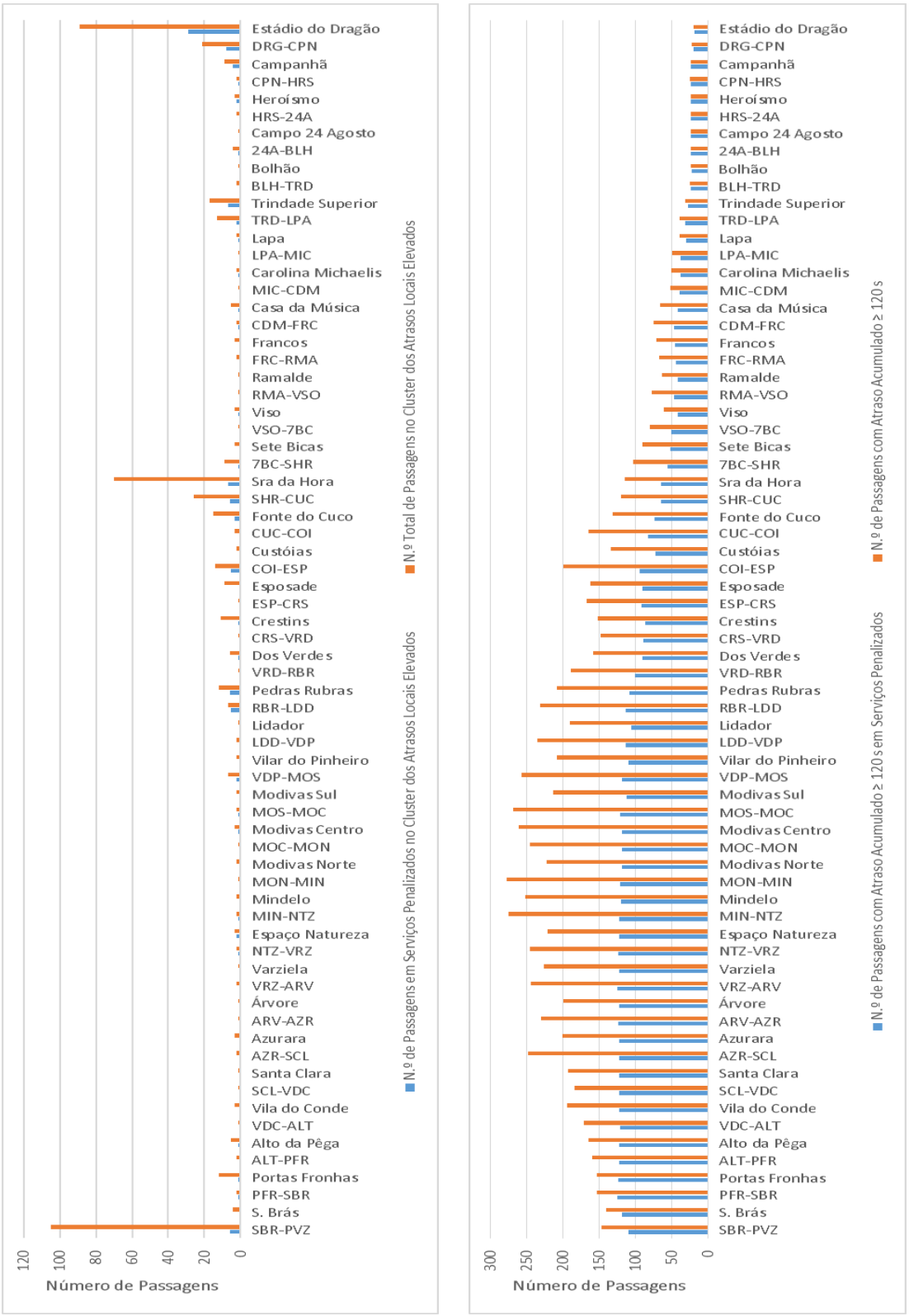


Figura 19 - Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa de Varzim (março de 2018, exceto quartas-feiras)

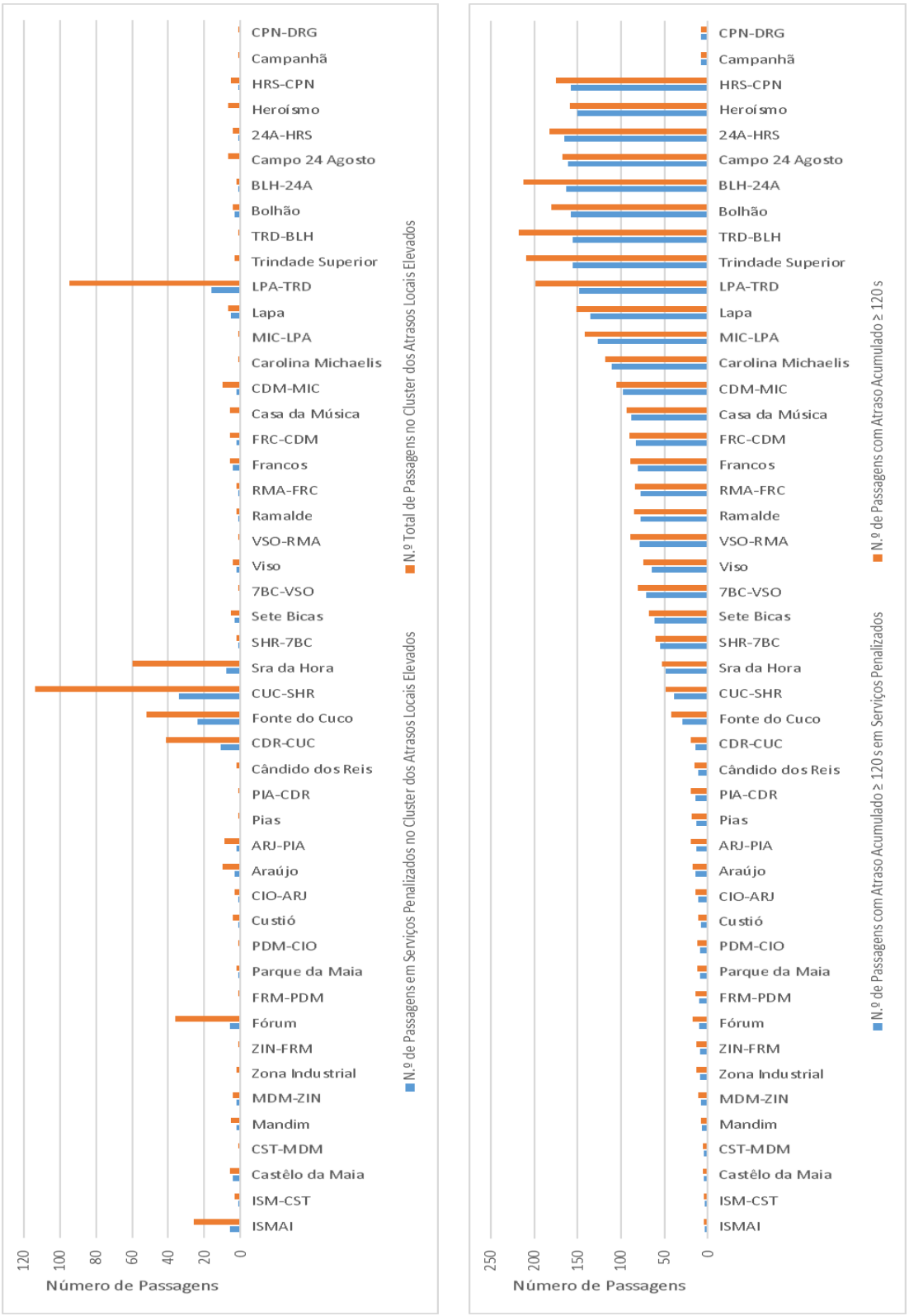


Figura 20 - Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI - Campanhã (março de 2018, exceto quartas-feiras)

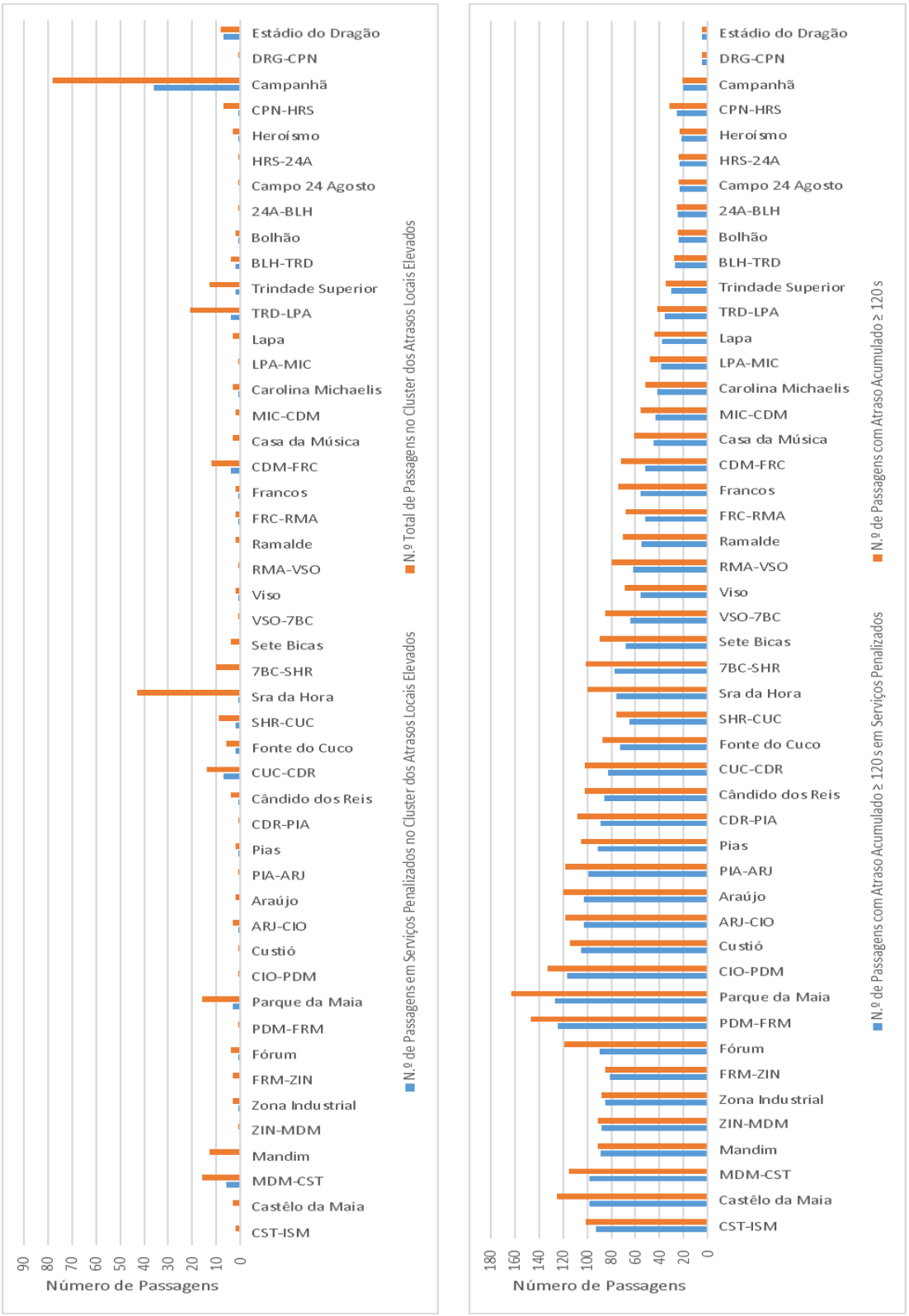


Figura 21 - Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Campanhã - ISMAI (março de 2018, exceto quartas-feiras)

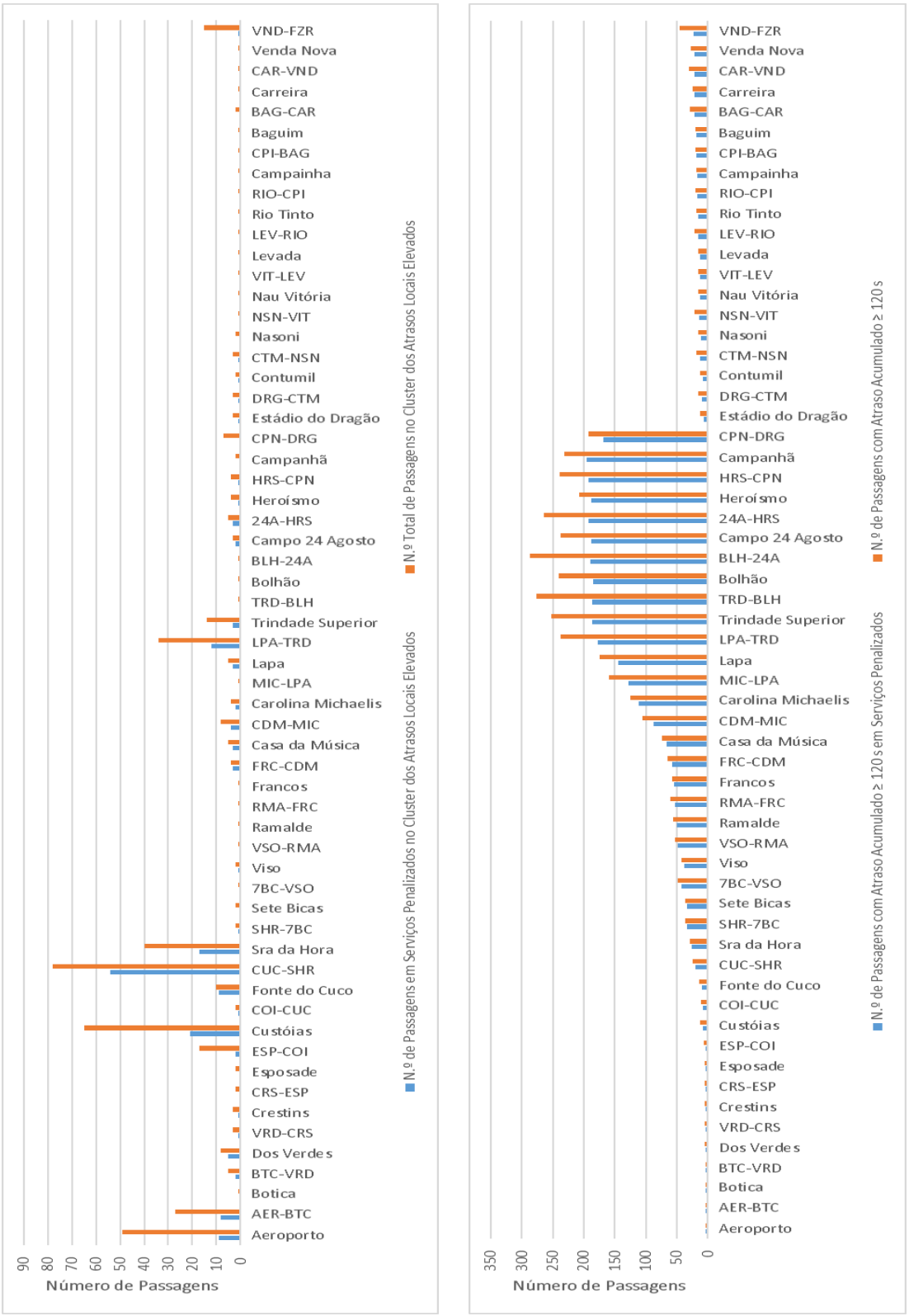


Figura 22 - Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto - Fânzeres (março de 2018, exceto quartas-feiras)

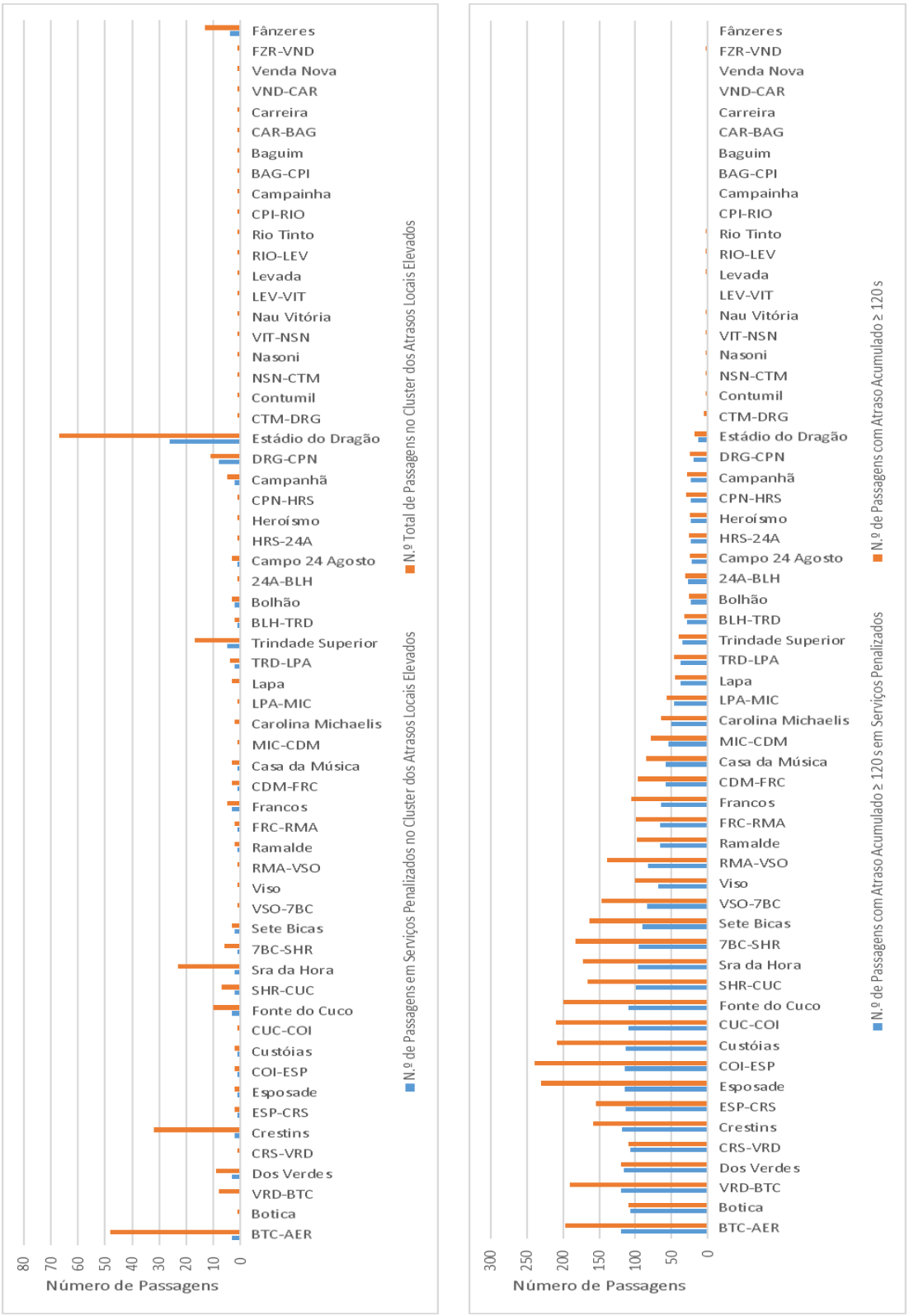


Figura 23 - Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres – Aeroporto (março de 2018, exceto quartas-feiras)

5.1.3. INFLUÊNCIA DAS RESTANTES VARIÁVEIS

Finalizada a análise da distribuição espacial dos atrasos locais, procedeu-se a uma análise de sensibilidade por forma a verificar o efeito provocado pelas outras variáveis incluídas na base de dados e com possível influência nos atrasos globais do sistema. São essas a caracterização dos veículos relativamente à sua quantidade e ao tipo, ao dia da semana, à hora do dia, às trocas de agente de condução e à entropia nos canais partilhados.

A distribuição temporal ao longo dos dias da semana dos atrasos localizados é apresentada na tabela 8, onde é possível visualizar a maior incidência nos dias úteis. Distribuindo equitativamente a percentagem por todos os dias (excluindo quarta-feira) esta seria de 17%, contudo as frequências praticadas nos fins-de-semana são inferiores às de segunda a sexta-feira, pelo que esta distribuição suporta o facto de as perdas localizadas serem na sua maioria aliadas a fenómenos sistemáticos na dimensão espacial. Nos dias úteis as percentagens variam entre os 16 e os 22%, enquanto que nos sábados e domingos estas variam entre os 8 e os 15%.

Tabela 8 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais por dia da semana, exceto quartas-feiras (%)

Dia da semana	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Segunda	19	22	17	22	16
Terça	17	18	19	20	17
Quinta	22	16	17	16	19
Sexta	22	16	17	18	20
Sábado	11	13	13	11	15
Domingo	8	14	15	12	13

A distribuição temporal dos atrasos locais pelas horas do dia está representada na tabela 9, e para uma melhor compreensão da mesma, é de referir que o serviço normal do metropolitano do Porto tem como horário normal das 6h até à 1h do dia seguinte, aproximadamente. Apenas em dias festivos e aos fins-de-semana no horário de Verão é que o serviço decorre durante a noite. Logo considerando que os veículos circulam 19 horas por dia e distribuindo a percentagem em iguais porções por esse período de tempo tem-se um valor médio de, aproximadamente, 5%.

Mais uma vez, a distribuição temporal mostra o efeito sistemático anteriormente descrito das perdas localizadas no espaço, apenas sobressaindo ligeiramente nos períodos de ponta horária, especialmente no de fim de tarde, e uma menor incidência no período noturno, devido às menores frequências praticadas mas também a menores movimentações da população nos segmentos anteriormente referidos.

Tabela 9 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais por período horário, exceto quartas-feiras (%)

Período horário	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
0-1	4	4	4	3	4
1-2	2	2	3	2	2
2-3	0	0	1	0	1
3-4	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0
5-6	0	0	1	1	1
6-7	6	5	5	5	4
7-8	6	5	5	5	5
8-9	7	5	5	6	6
9-10	7	5	5	5	6
10-11	5	6	5	5	5
11-12	4	6	5	5	5
12-13	4	6	6	5	5
13-14	5	6	6	5	5
14-15	5	6	5	6	5
15-16	5	6	5	5	5
16-17	6	6	5	6	6
17-18	7	6	6	7	7
18-19	7	6	6	7	7
19-20	6	5	5	6	7
20-21	4	5	5	5	5
21-22	2	4	4	3	4
22-23	4	3	4	3	4
23-24	4	3	4	3	4

Analisadas as diferentes distribuições temporais, segue-se a demonstração das frequências relativas associadas ao material circulante (tabelas 10 e 11). A primeira representa a distinção entre o tipo de veículo, onde a proporção dos atrasos locais na linha A é refletida na grande percentagem afeta às viaturas *Eurotram*. Apesar da elevada representação deste tipo de veículo nos atrasos locais, e tendo em conta que a disposição e comportamento da linha E são semelhantes às linhas B e C, considera-se que esta variável não tem influência nas perturbações induzidas ao horário. Relativamente à quantidade de veículos utilizados nas passagens afetadas por essas perturbações, as composições duplas estão mais

repesentadas nos *clusters*, não sendo anormal visto ser a disposição associada às horas de ponta. Assim, esta distribuição não será igualmente de grande relevo para a ocorrência de atrasos locais.

Tabela 10 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais por tipo de veículo, exceto quartas-feiras (%)

Tipo de veículo	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Eurotram	78	78	87	74	82
Tram-train	22	22	13	26	18

Tabela 11 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais por número de veículos utilizados por composição, exceto quartas-feiras (%)

N.º de veículos	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Simples	48	38	26	43	67
Dupla	51	62	74	57	33

Como se pode observar nas tabelas 12 e 13, as trocas de agentes de condução não se revelaram como causas para a ocorrências de atrasos locais, visto que apenas em menos de 3% das passagens totais afetas aos *clusters* associados às perturbações ocorreu uma mudança de agente. A percentagem relativa às trocas que tiveram lugar anteriormente às passagens em análise é naturalmente mais elevada, pois a variável de identificação do local da mudança de agente de condução está incluída nesta. Contudo o seu máximo nos meses em análise é de 6%.

Tabela 12 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais em função da troca de agente de condução no local, exceto quartas-feiras (%)

Troca no local	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Sim	3	2	1	2	1
Não	97	98	99	98	99

Tabela 13 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais em função da troca de agente de condução desde o início da viagem, exceto quartas-feiras (%)

Troca na viagem	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Sim	6	5	5	5	5
Não	94	95	95	95	95

Por último, foi estudada a influência da entropia (tabela 14), sendo que apenas uma percentagem reduzida de atrasos locais está associado à passagem de viagens distintas consecutivas num curto espaço de tempo. Este resultado já seria esperado visto que as perdas localizadas incidem em troços fora do tronco comum e nos términos (associados a inícios de partida).

Tabela 14 - Distribuição das passagens contidas nos *clusters* dos elevados atrasos locais em função da da variável de entropia de rede, exceto quartas-feiras (%)

Passagem anterior de outro serviço	Março	Abril	Maio	Julho	Agosto
Sim	26	17	5	19	19
Não	74	83	95	81	81

5.2. ANÁLISE DO INDICADOR DE DESEMPENHO "DISPERSÃO DO INTERVALO"

5.2.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ELEVADAS DIFERENÇAS ENTRE INTERVALOS DE PASSAGEM

A metodologia aplicada na análise deste indicador de desempenho foi idêntica à do indicador "Atraso", contudo os agrupamentos obtidos na análise de *clusters* não indicaram nenhum fator preponderante no desajuste da frequência nesta linha. Recorreu-se então ao estudo das passagens consecutivas com uma diferença elevada entre os intervalos de passagem observado e planeado. Considera-se como uma diferença elevada aquelas com valores superiores a 120 segundos associadas a atrasos e adiantos, devidamente identificadas pelas variáveis *Pen+* e *Pen-*, respetivamente.

Nas figuras 24 e 25, encontram-se representadas, para os meses de março e agosto de 2018, a distribuição espacial do número de passagens com atraso (barras azuis) ou com adianto (barras cor-de-laranja) superior a 120 segundos relativamente à anterior nesse mesmo local. Com a análise a estas representações é pretendido identificar quais os pontos da linha D associados a aumentos dos desajustes da frequência, sendo que foram escolhidos dois meses que revelam comportamentos semelhantes aos remetidos para anexo (Anexo A2) e correspondem aos dois tipos de horário existentes, de verão e de inverno. De referir que esta análise não é influenciada pelo estudo do indicador de desempenho "Atraso", pelo que a representação do mês de junho encontra-se no referido anexo.

Observando os gráficos dos meses de referência apresentados, verifica-se a consonância entre os valores dos limites definidos positivos e negativos. Este fenómeno deve-se à própria natureza do indicador e significa que quando uma viagem se atrasa num dado local em relação à que passou anteriormente, irá eventualmente aproximar-se da que se segue, caso esta não sofra um atraso semelhante.

Na maioria dos meses em análise, a tendência para um aumento mais acentuado de viagens desajustadas temporalmente relativamente às anteriores ocorre a partir das imediações do troço entre as estações de São Bento e de Jardim do Morro. Este percurso é caracterizado pela existência da Ponte Luiz I, monumento que liga as cidades do Porto e Vila Nova de Gaia e com elevados índices de procura relacionados com a atividade turística. O tabuleiro superior desta obra de arte permite um tráfego de peões e metro sem separação física e tem vindo a ser apontado como estreito em períodos de maior afluência. Por sua vez, quanto mais elevado for o número de peões no tabuleiro, menor será a velocidade de circulação praticada por motivos de segurança, o que, associado à aleatoridade da afluência, provoca um efeito imprevisível nos atrasos ou adiantos das viagens.

Nos restantes meses onde esta tendência não se verifica, o aumento de viagens com desregulações consideráveis ocorre de forma gradual ao longo dos trajetos. É ainda possível observar, no sentido Santo Ovídio – Hospital São João, uma recuperação dos desajustes na estação I.P.O., especialmente nas grandes diferenças negativas. Esta estação localiza-se numa zona de elevada procura onde se inclui o Hospital São João e vários estabelecimentos de ensino superior, pelo que esta recuperação pode ser encarada como resultado de eventuais atrasos induzidos pela procura que resultem num efeito regulador da frequência.

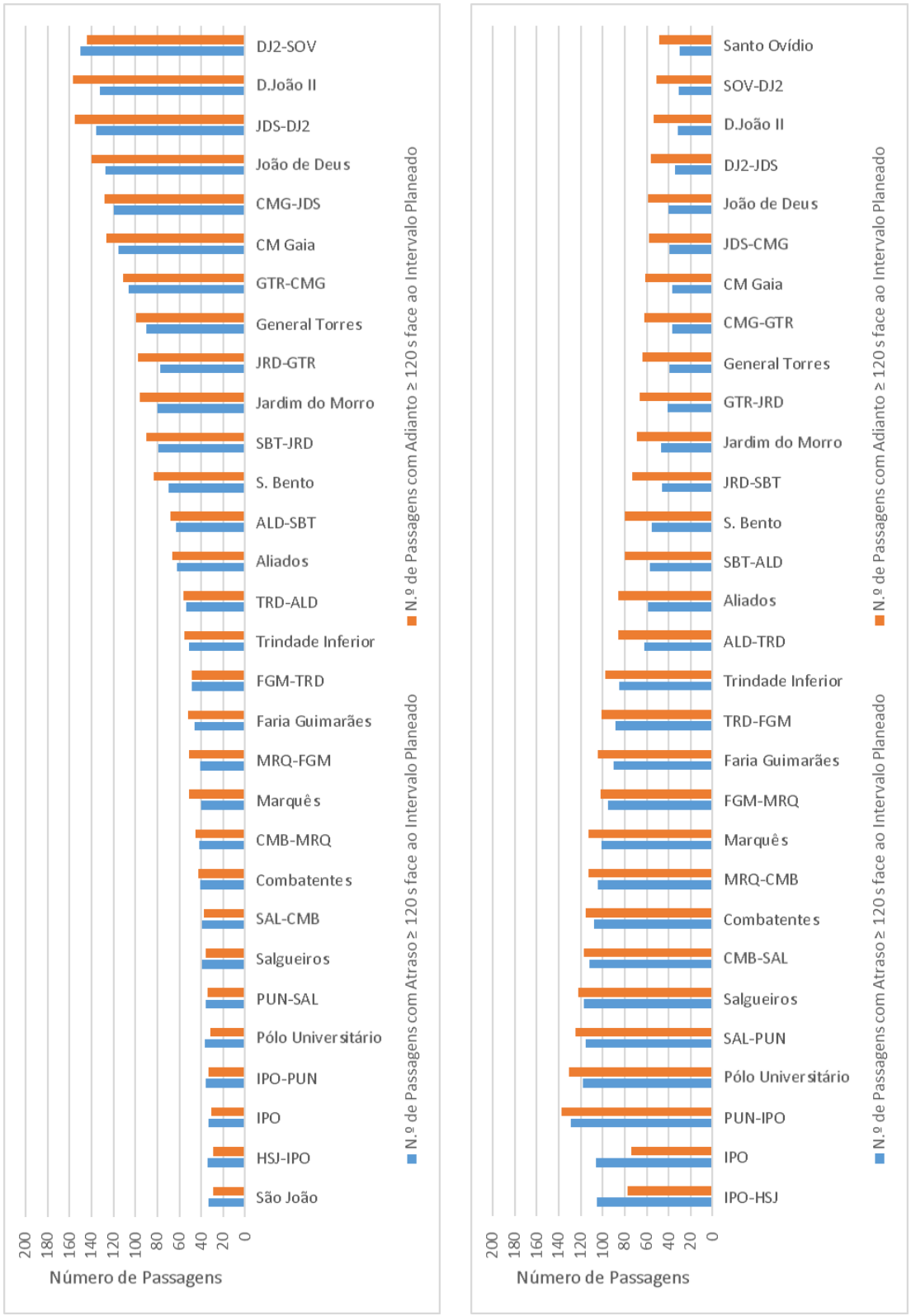


Figura 24 - Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em março de 2018 (exceto quartas-feiras)

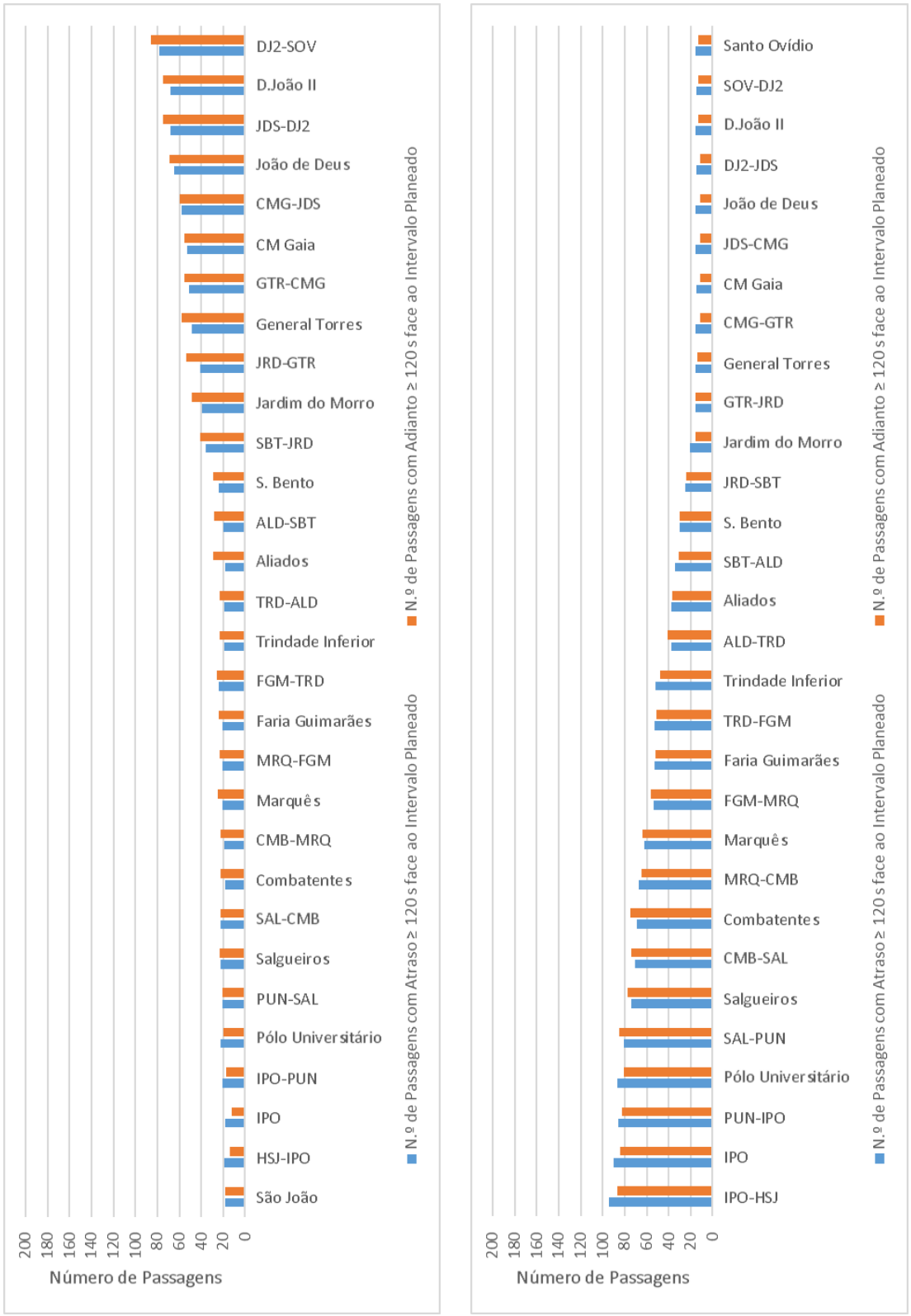


Figura 25 - Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em agosto de 2018 (exceto quartas-feiras)

5.2.2. Influência das Restantes Variáveis na Regularidade

Analogamente à análise realizada para o indicador de desempenho "Atraso", foram estudadas as frequências relativas das restantes variáveis possivelmente influentes no desajuste da frequência de passagem de veículos na linha D.

Na tabela 15, é demonstrada a distribuição dos intervalos de passagem desajustados nos dias ao longo da semana, exceto quartas-feiras. De março a maio de 2018, verifica-se uma preponderância nos dias úteis dos desfasamentos entre composições, também explicado pelas maiores frequências nestes dias da semana. Com a passagem para o horário de verão, entre 15 de junho e 15 de setembro, é notado um maior equilíbrio entre os dias de segunda a sexta-feira e o fim-de-semana, sendo que em agosto o panorama altera-se. Neste mês, os dias de fim-de-semana recolhem 42% dos desajustes totais da linha D. No conjunto dos valores obtidos, a frequência relativa associada aos dias úteis varia entre os 10 e os 35%, ao passo que as percentagens correspondentes a sábados e domingos alternam entre os 4 e os 26%.

Tabela 15 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por dia da semana, exceto quartas-feiras (%)

Dia da semana	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Segunda	28	18	18	21	28	12
Terça	15	12	19	24	23	17
Quinta	29	21	32	11	10	10
Sexta	17	35	18	17	17	18
Sábado	7	8	6	16	10	26
Domingo	4	6	6	12	12	16

Aos períodos de ponta horária voltam a estar associados valores mais penalizadores em comparação com as restantes horas, como se pode constatar na tabela 16. O motivo mais provável na base da desregulação nestes períodos será, tal como na análise às restantes linhas, as interações com o tráfego rodoviário e pedonal nos troços à superfície e sem barreira física de separação. Em agosto, mês associado a férias e atividades de veraneio, a hora de ponta da manhã não se assume como um período de elevados desajustes, como ocorre nos restantes meses, contudo este efeito é mais alargado ao final da tarde (entre as 17h e as 22h).

Tabela 16 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por período horário, exceto quartas-feiras (%)

Período horário	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
0-1	1	1	1	2	2	4
1-2	0	0	1	1	0	3
2-3	1	0	0	0	0	0
3-4	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	1	0	0
5-6	0	0	0	1	0	0
6-7	1	3	2	1	5	3
7-8	5	2	3	1	11	7
8-9	14	5	9	4	7	6
9-10	10	11	11	5	5	3
10-11	7	8	10	6	6	2
11-12	3	6	6	7	6	2
12-13	3	5	5	5	6	2
13-14	9	7	3	6	6	6
14-15	6	8	5	5	7	4
15-16	4	5	6	8	8	3
16-17	4	5	4	6	5	4
17-18	8	4	5	8	2	8
18-19	9	7	8	9	6	9
19-20	8	9	9	6	7	8
20-21	2	3	4	6	5	9
21-22	1	3	5	5	2	7
22-23	2	2	1	2	2	6
23-24	1	2	1	3	2	3

Na linha D apenas são utilizados os veículos *Eurotram* e a maioria das viagens são realizadas por composições duplas, pelo que a distribuição de desajustes pela quantidade de veículos utilizados é naturalmente superior para passagens com dois veículos (tabela 17). O mês de agosto apresenta-se novamente como uma exceção, quando a procura e a as frequências são inferiores, bem como as movimentações do restante tráfego nos segmentos à superfície.

Tabela 17 Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D por número de veículos utilizados por composição, exceto quartas-feiras (%)

N.º de veículos	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Simples	16	21	17	29	30	57
Dupla	84	79	83	71	70	43

Por último, as trocas não se revelaram como possível causa para os desajustes de intervalos de passagem já que, conforme se pode verificar nas tabelas 18 e 19, a sua representatividade nos valores identificados como acima do limite definido é muita reduzida.

Tabela 18 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D em função da troca de agente de condução no local, exceto quartas-feiras (%)

Troca no local	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Sim	0	0	0	1	1	1
Não	100	100	100	99	99	99

Tabela 19 - Distribuição dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D em função da troca de agente de condução desde o início da viagem, exceto quartas-feiras (%)

Troca na viagem	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Sim	8	7	6	7	5	9
Não	92	93	94	93	95	91

De realçar que, no caso da linha D, não se realiza a análise para a entropia do sistema, uma vez que não partilha o canal com outros serviços.

6
CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação teve como objetivo a identificação de fatores com influência na pontualidade e regularidade de sistemas de transporte ferroviários urbanos. Inseriu-se no caso de estudo do metropolitano ligeiro da área metropolitana do Porto, com o intuito de aplicar a metodologia proposta a um caso real.

O procedimento utilizado consistiu na aplicação de técnicas de *data mining*, desde o processamento das bases de dados originais, registadas pelo *Traffic Management System* (TMS), até à compreensão dos padrões resultantes do processo de análise de *clusters* por via do algoritmo das k-médias. Esta ferramenta de classificação não hierárquica revelou-se de grande utilidade no que concerne à avaliação da pontualidade. Contudo, não demonstrou a mesma eficácia no que diz respeito à identificação de efeitos perturbadores relativos à regularidade dos serviços.

A fase final da análise consistiu na distribuição das frequências relativas das variáveis que não foram iteradas na análise *cluster* considerada, apenas para passagens com valores superior aos limites definidos inicialmente.

Em relação à análise dos fatores com influência na pontualidade, para o caso do metro do Porto, foi concluído que o principal foco de perturbação advém da inserção urbana do sistema de metropolitano quando a sua circulação é realizada à superfície e interage com o tráfego rodoviário e pedonal, condicionando o seu normal funcionamento. Ao ocorrer de forma sistemática nos troços do segmento Senhor de Matosinhos – Senhora da Hora, irá causar atrasos acumulados nas viagens da linha A que poderão ser suscetíveis de provocar constrangimentos na coordenação do entroncamento, o que por sua vez poderá fazer com que os atrasos acumulados se propaguem a montante do local de convergência nas restantes linhas. As perdas localizadas observadas nos entroncamentos a montante do tronco comum indiciam que as composições têm períodos de espera para permitirem a entrada e saída de viagens da linha A devido a essa desregulação. Sofrendo estes atrasos locais, a probabilidade de os serviços chegarem aos respetivos destinos com atrasos acumulados elevados aumenta, podendo inclusivamente iniciar a viagem seguinte mais tarde do que o previsto, consoante a magnitude desses atrasos e o tempo de suporte atribuído.

Ainda referente à pontualidade, foi também concluído que a estação Trindade, ponto central da rede em estudo, é a única que sofre perturbações de forma sistemática, presumivelmente devido ao efeito da procura.

Em função dos resultados obtidos para o indicador de performance relativo à regularidade, os segmentos à superfície, com interseções de nível com o tráfego rodoviário e sem separação física com o tráfego pedonal, revelaram-se novamente como os locais mais propensos a desregulação. O troço onde se insere

a Ponte Luiz I assume-se como o local a partir do qual os desajustes a nível de frequências se intensificam em ambos os sentidos de circulação. Quando não é verificado tal fenómeno, os incrementos destas desregulações tendem a ser graduais ao longo dos percursos.

Por último, foi observada a diminuição das diferenças elevadas entre intervalos de passagem praticados e teóricos na estação I.P.O., no sentido Santo Ovídio – Hospital São João. A esta estação está associada uma elevada procura, pelo que se crê que, para este indicador, a entrada e saída de passageiros possa ter um efeito regulador das frequências praticadas.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com as conclusões retiradas da presente dissertação, foi possível ter uma visão geral sobre as causas para os desajustes dos horários estabelecidos. A metodologia aplicada produziu resultados satisfatórios relativamente aos indicadores de desempenho em estudo, pelo que seria interessante verificar a aplicabilidade do procedimento na análise de outros sistemas de metro.

Após a identificação dos troços que são alvo de atrasos locais e respetiva quantificação, deve-se avançar com medidas corretivas de forma a garantir uma boa adesão do horário praticado ao planeado. Uma das possibilidades, sabendo que a maioria dos atrasos locais se dá no segmento Senhor de Matosinhos – Senhora da Hora, é de realizar diagramas de velocidades de operação por forma a atualizar os tempos de percurso entre estações e, consequentemente, do segmento. Por outro lado, o desenvolvimento de modelos de simulação permitiriam o teste de medidas de correção e respetiva estimação de impactos em simultâneo para as diversas linhas, apresentando-se assim como uma solução mais completa do que a anterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] UITP, "Metro, light rail and tram systems in Europe," p. 44, 2012.

[2] J. Rabon, "The Tube: A History of the London Underground." [Online]. Available: https://londontopia.net/history/history-london-underground/. [Accessed: 04-Dec-2018].

[3] T. Telegraph, "No Title." [Online]. Available: https://www.telegraph.co.uk/travel/destinations/europe/united-kingdom/england/london/galleries/The-history-of-the-Tube-in-pictures-150-years-of-London-Underground/) . [Accessed: 02-Jan-2019].

[4] A. Costa, "Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária – 13 - Transportes Públicos da CCDRN (Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte).," 2008.

[5] A. Lobo, "Análise da Exploração de Redes Urbanas de Transporte Ferroviário," 2008.

[6] NSW Government, "Integrated public transport service planning guidelines : Sydney Metropolitan Area," no. December, p. 43, 2013.

[7] N. G. Harris, "Train boarding and alighting rates at high passenger loads," *J. Adv. Transp.*, vol. 40, no. 3, pp. 249–263, 2006.

[8] R. M. P. Goverde and I. A. Hansen, "Performance indicators for railway timetables," *IEEE ICIRT 2013 - Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Rail Transp.*, pp. 301–306, 2013.

[9] I. A. Hansen, *Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation*. Eurailpress.

[10] M. K. Sameni, "Railway Track Capacity: Measuring and Managing," no. October, p. 198, 2012.

[11] J. Yuan, I. Hansen, J. Pachl, and T. Albrecht, "Statistical analysis of train delays," *Railw. Timetable Traffic*, pp. 170–181, 2008.

[12] M. Porto, "História." [Online]. Available: https://www.metrodoporto.pt/pages/321. [Accessed: 29-Nov-2018].

[13] M. do Porto, "Metro em números." [Online]. Available: https://www.metrodoporto.pt/pages/307. [Accessed: 29-Nov-2018].

[14] M. do Porto, "Veículos." [Online]. Available: https://www.metrodoporto.pt/pages/308.

[15] M. Mazzarello and E. Ottaviani, "A traffic management system for real-time traffic optimisation in railways," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 41, no. 2, pp. 246–274, 2007.

[16] S. Rui, X. Jianming, X. Xudong, and Z. Zuo, "On-Time Performance and Service Regularity of Stage Buses in Mixed Traffic," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 7, pp. 1137–1144, 2009.

ANEXOS

A1 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRASOS

A2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DESAJUSTES DOS INTERVALOS DE PASSAGEM

A1 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRASOS

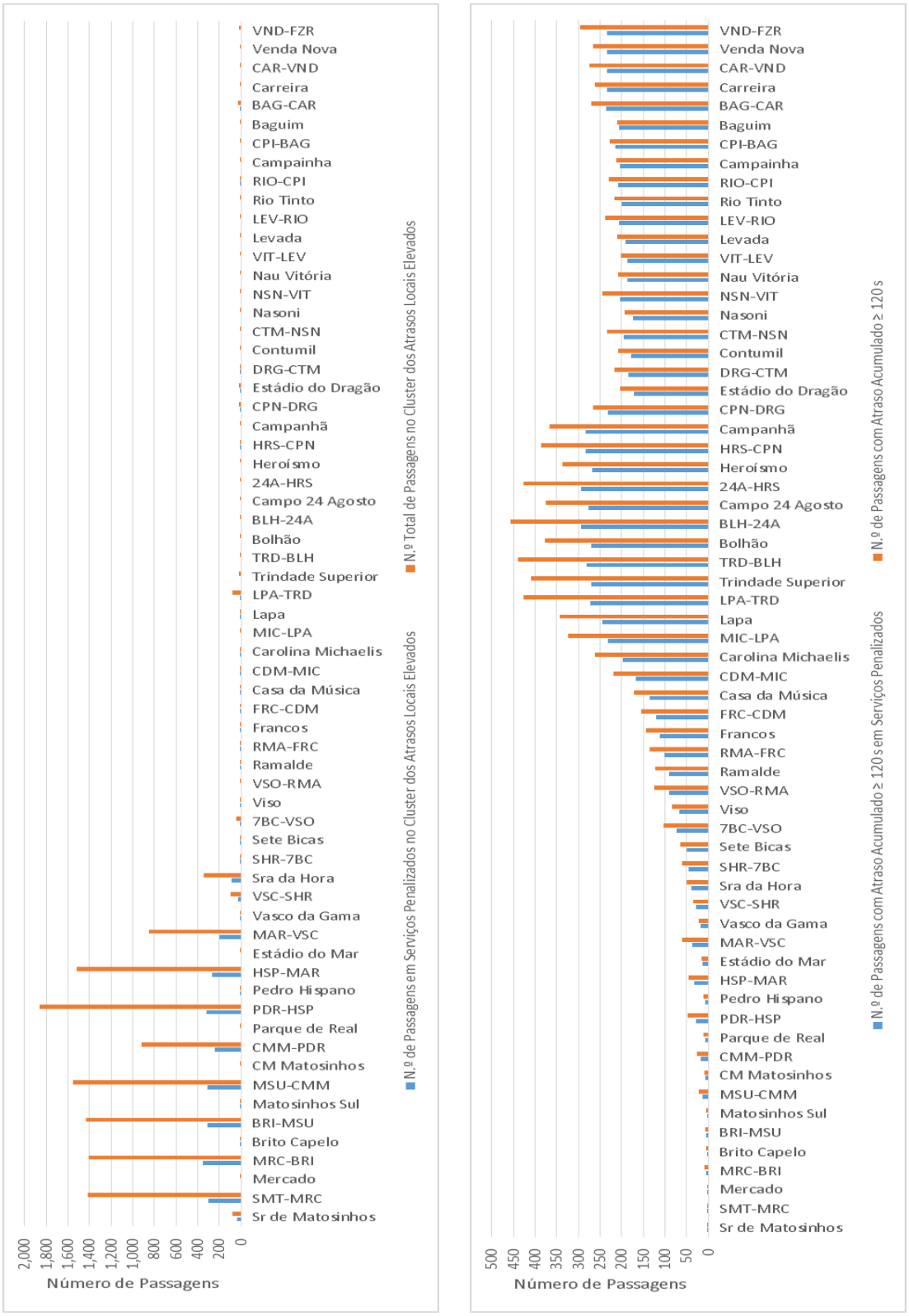


Figura A1.1 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

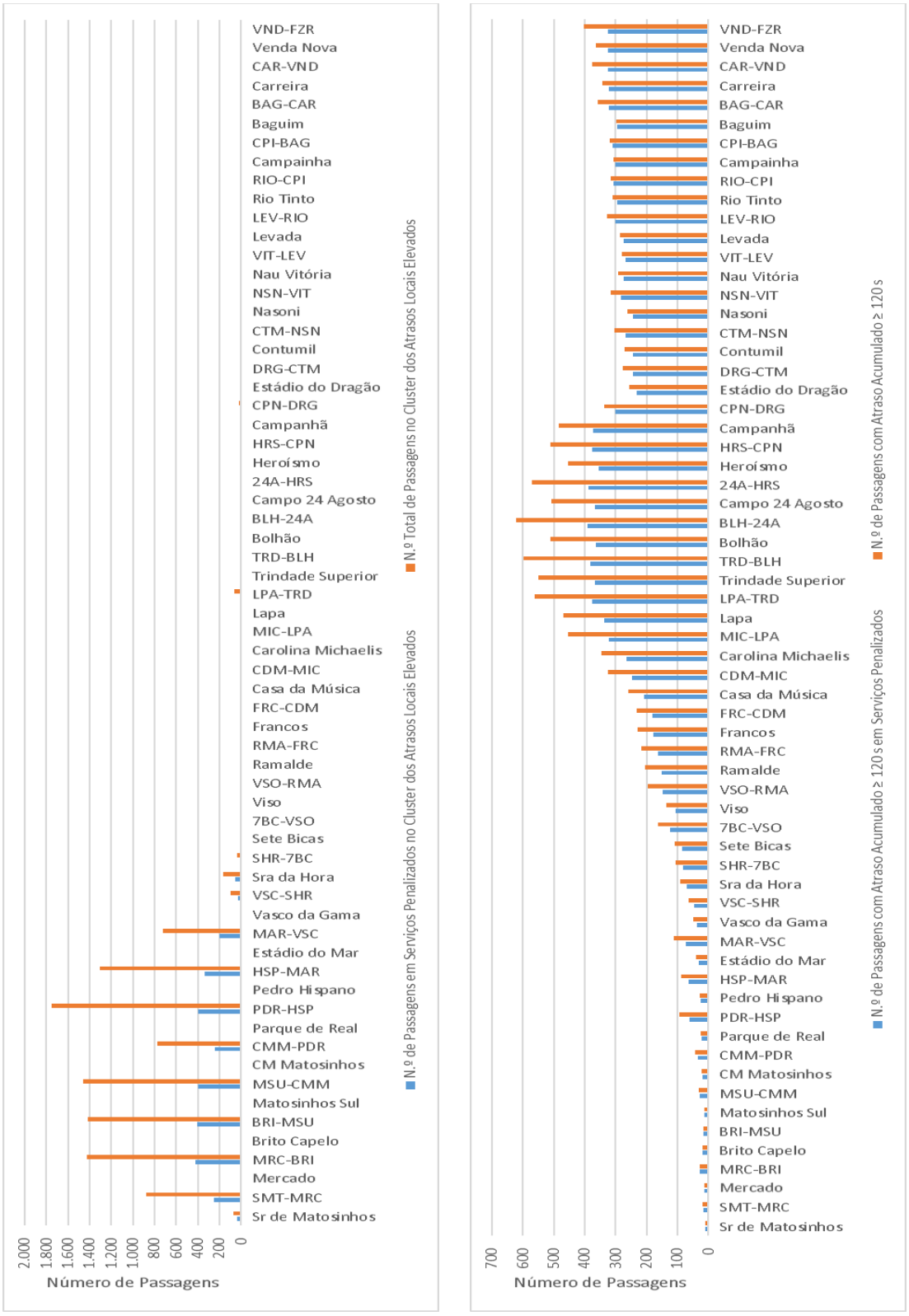


Figura A1.2 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

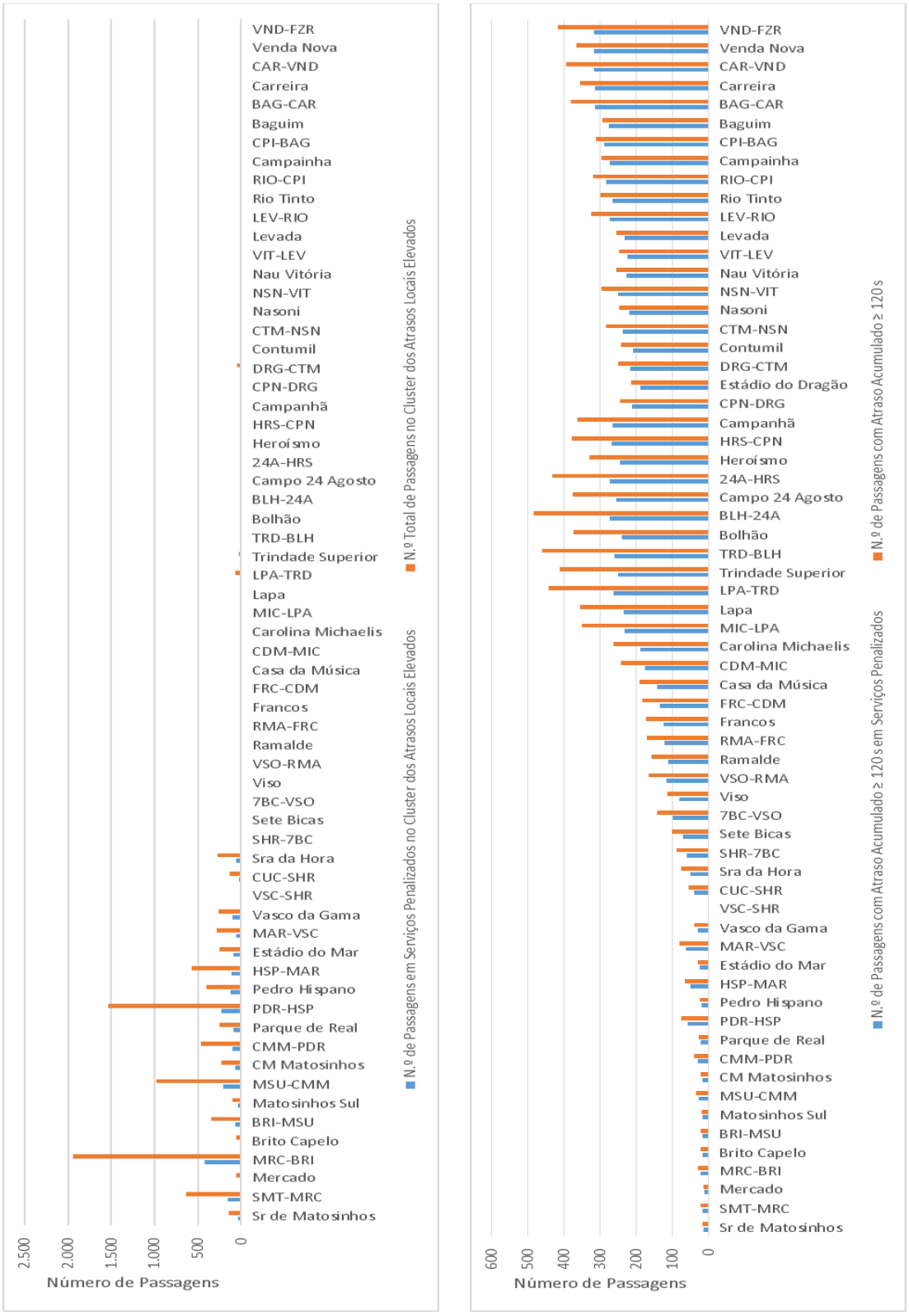


Figura A1.3 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

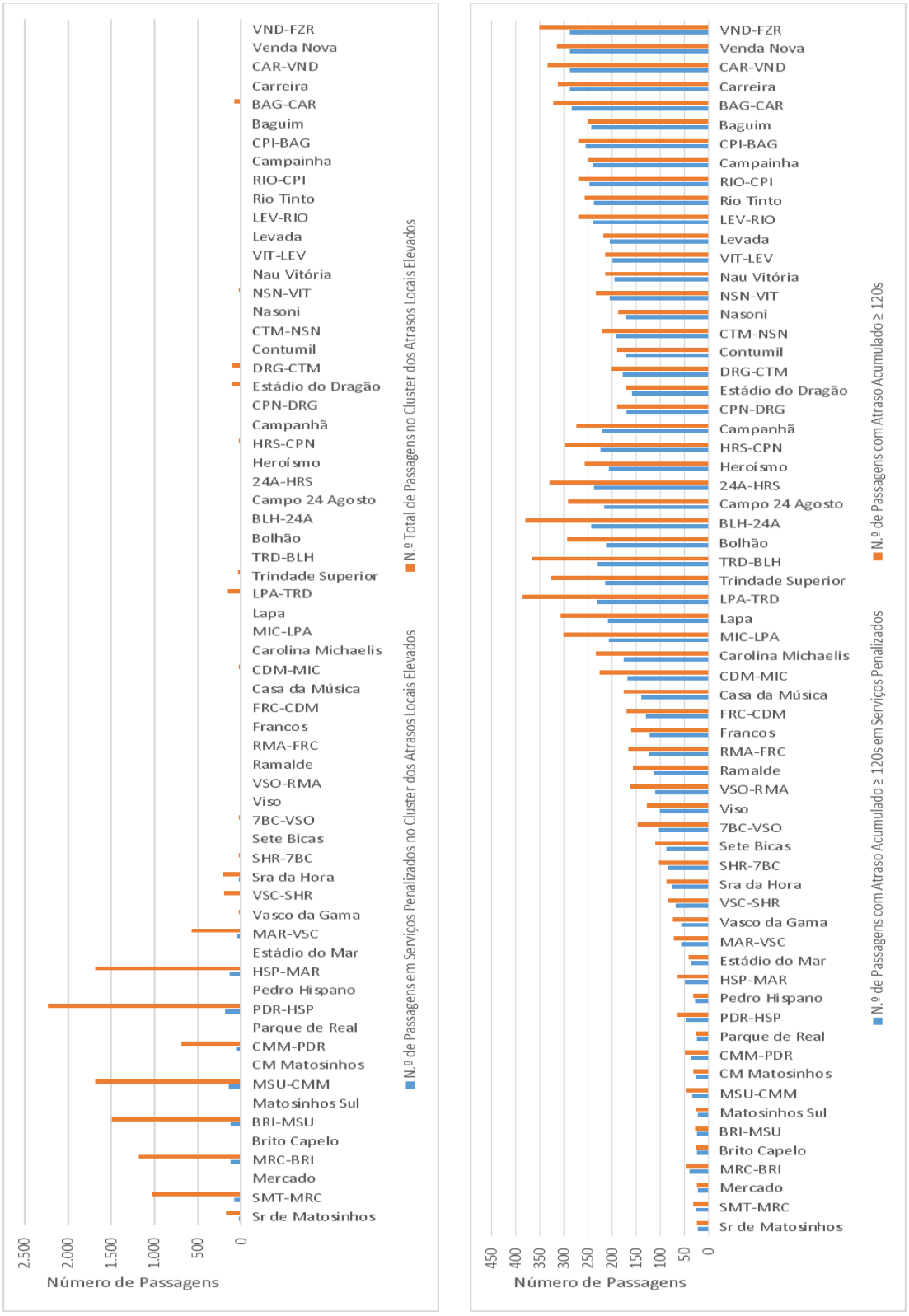


Figura A1.4 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Senhor de Matosinhos – Fânzeres (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)



Figura A1.5 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres – Senhor de Matosinhos (abril de 2018, exceto quartas-feiras)



Figura A1.6 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres – Senhor de Matosinhos (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

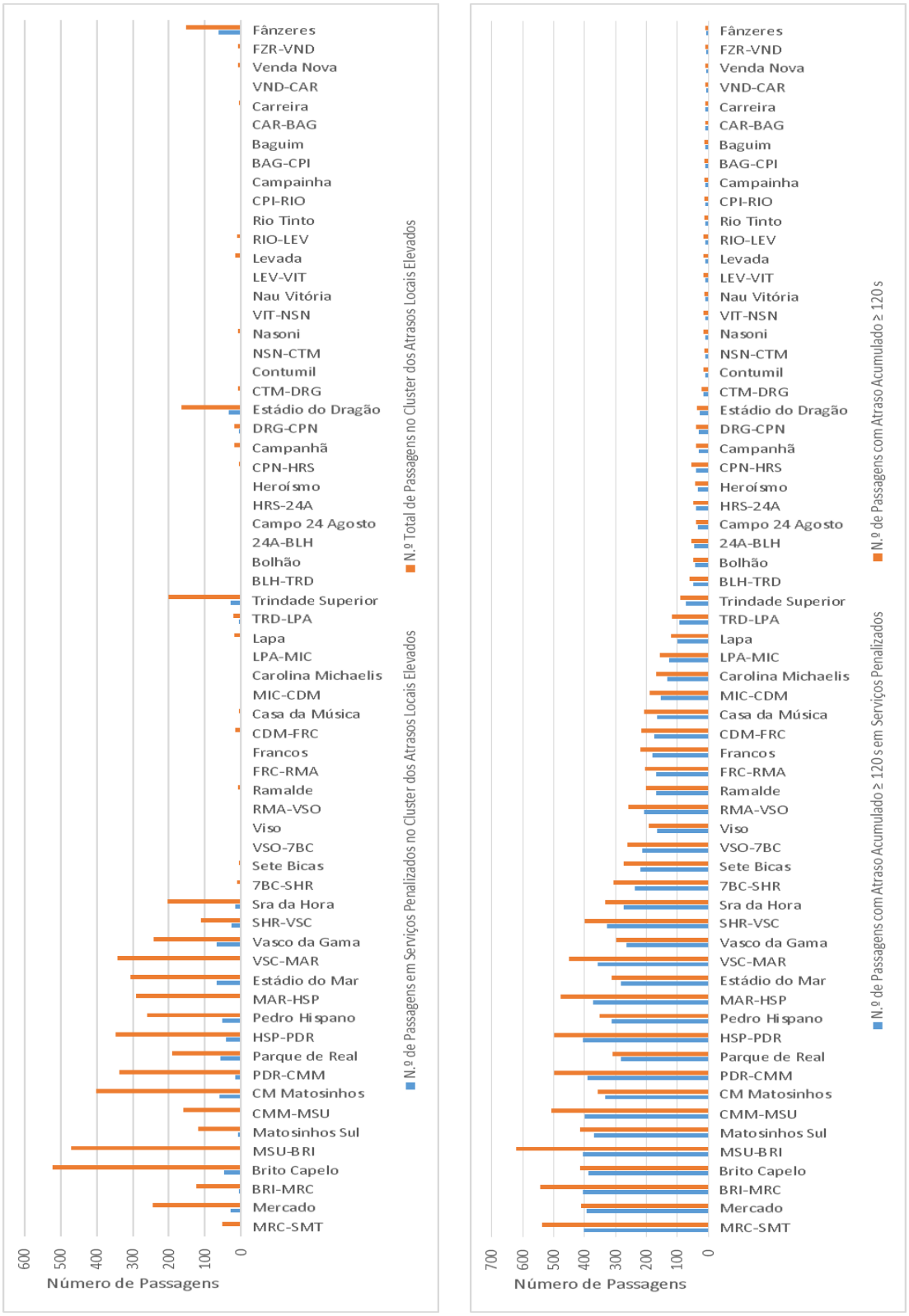


Figura A1.7 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres – Senhor de Matosinhos (julho de 2018, exceto quartas-feiras)



Figura A1.8 – Distribuição espacial dos atrasos na linha A, sentido Fânzeres – Senhor de Matosinhos (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

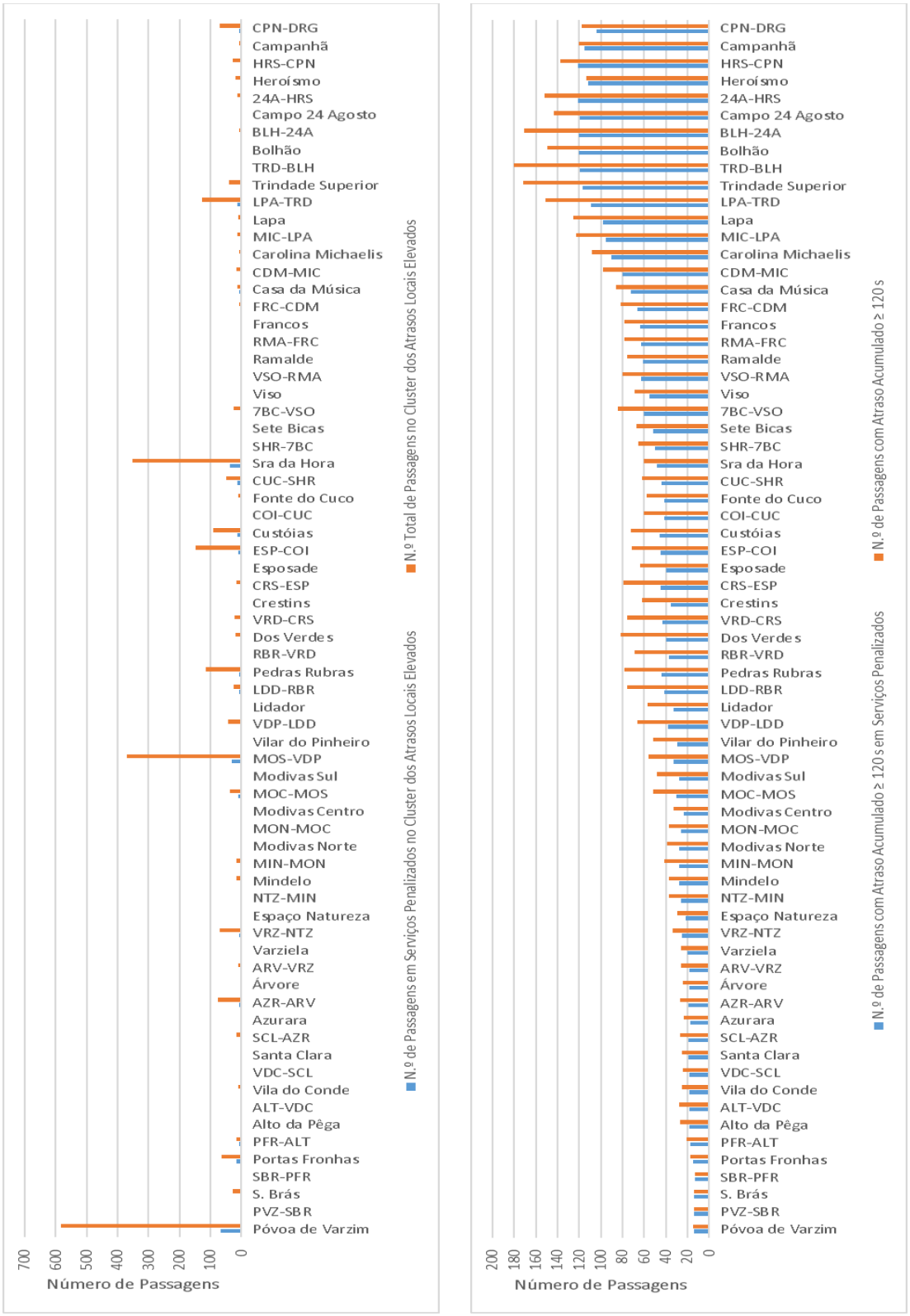


Figura A1.9 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa do Varzim – Estádio do Dragão (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

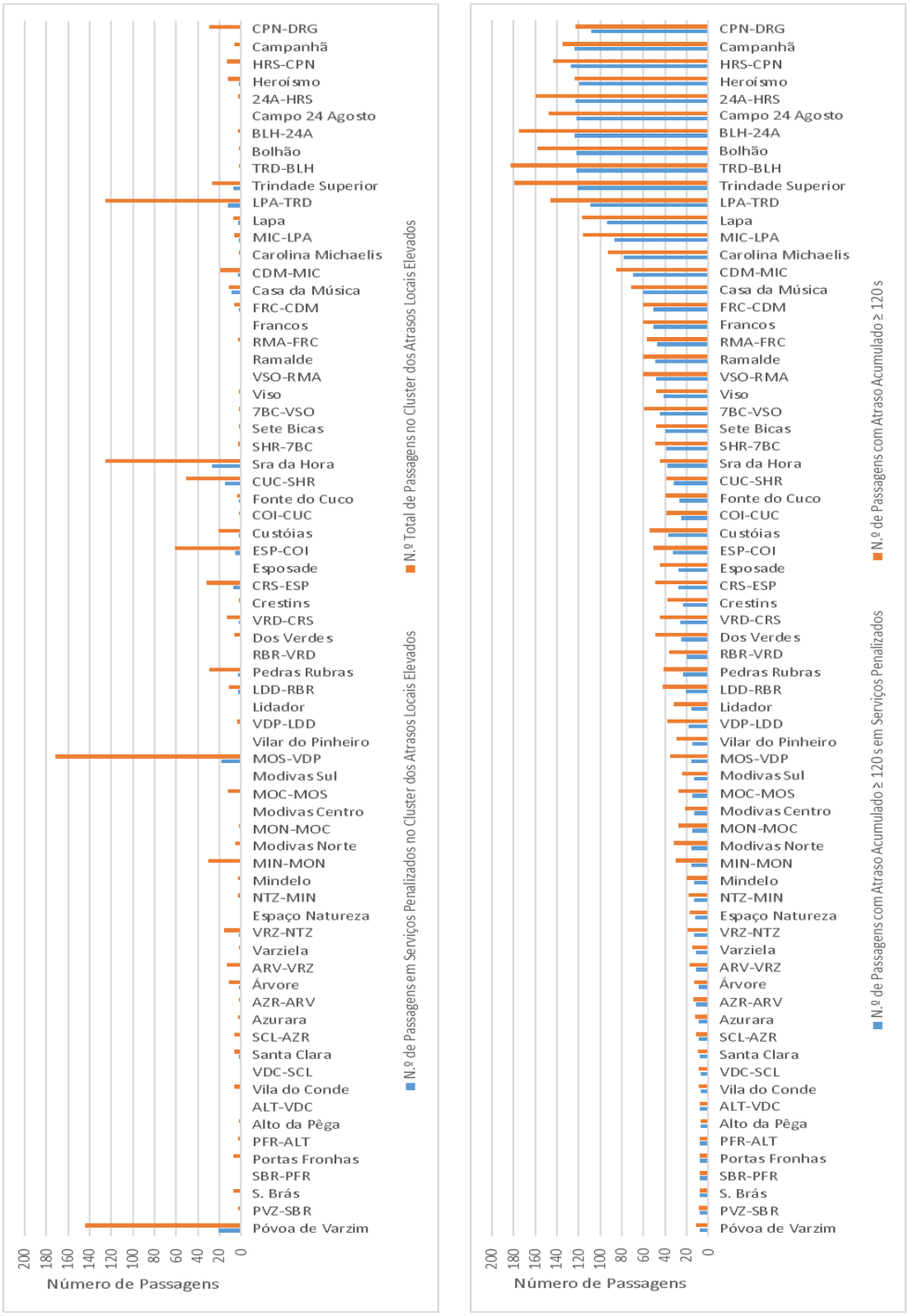


Figura A1.10 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa do Varzim – Estádio do Dragão (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

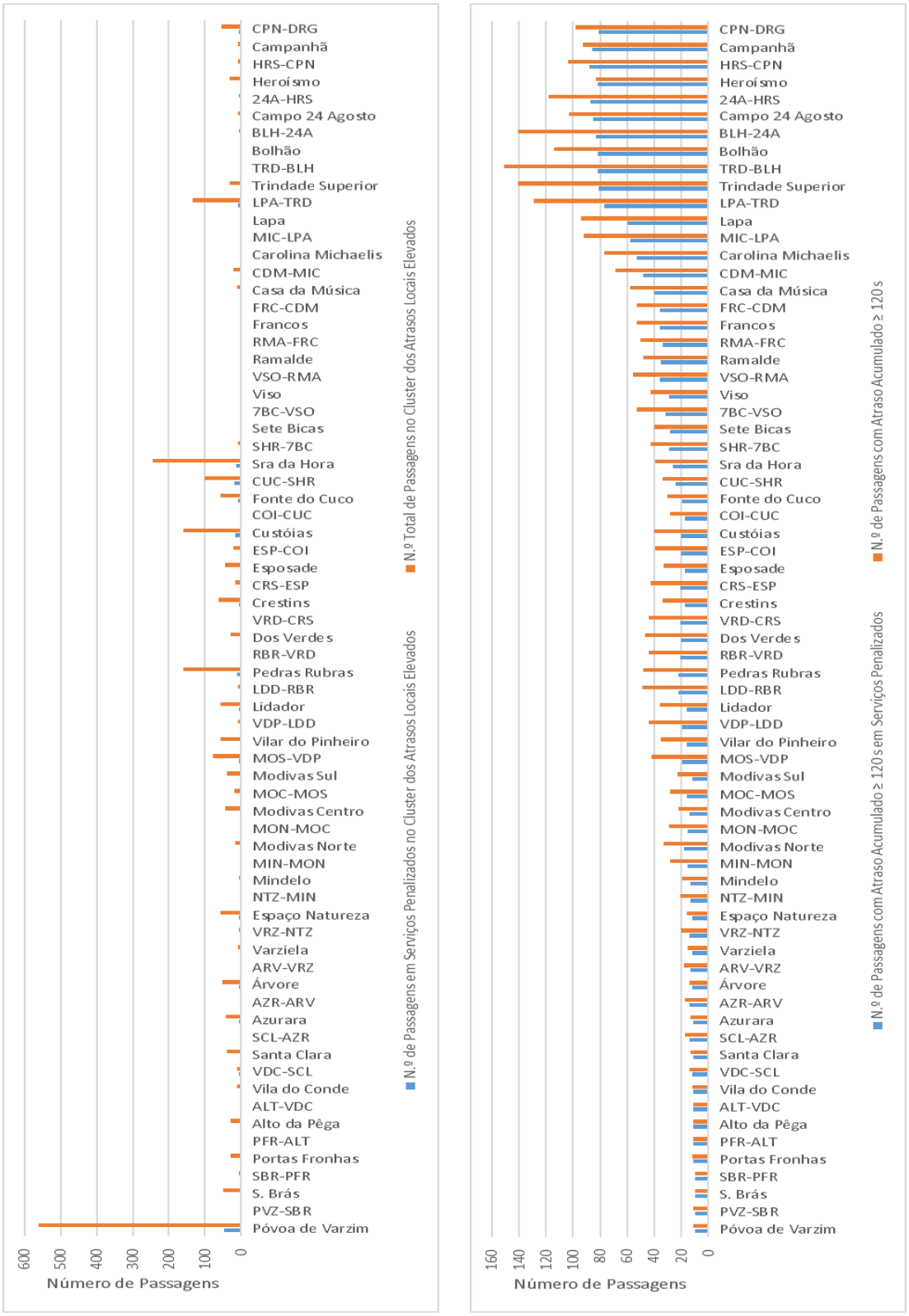


Figura A1.11 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa do Varzim – Estádio do Dragão (julho de 2018, exceto quartas-feiras)



Figura A1.12 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Póvoa do Varzim – Estádio do Dragão (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

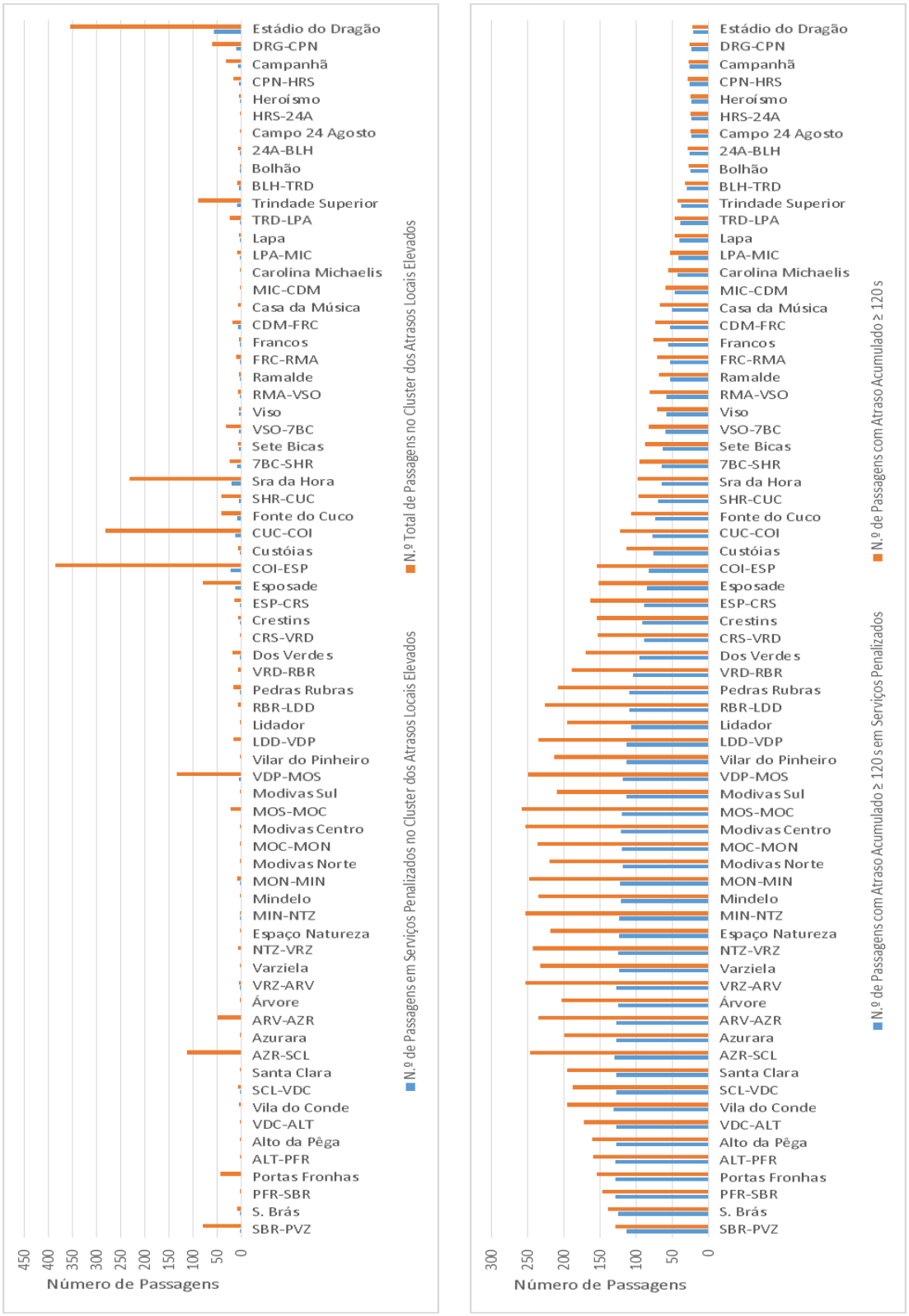


Figura A1.13 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa do Varzim (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

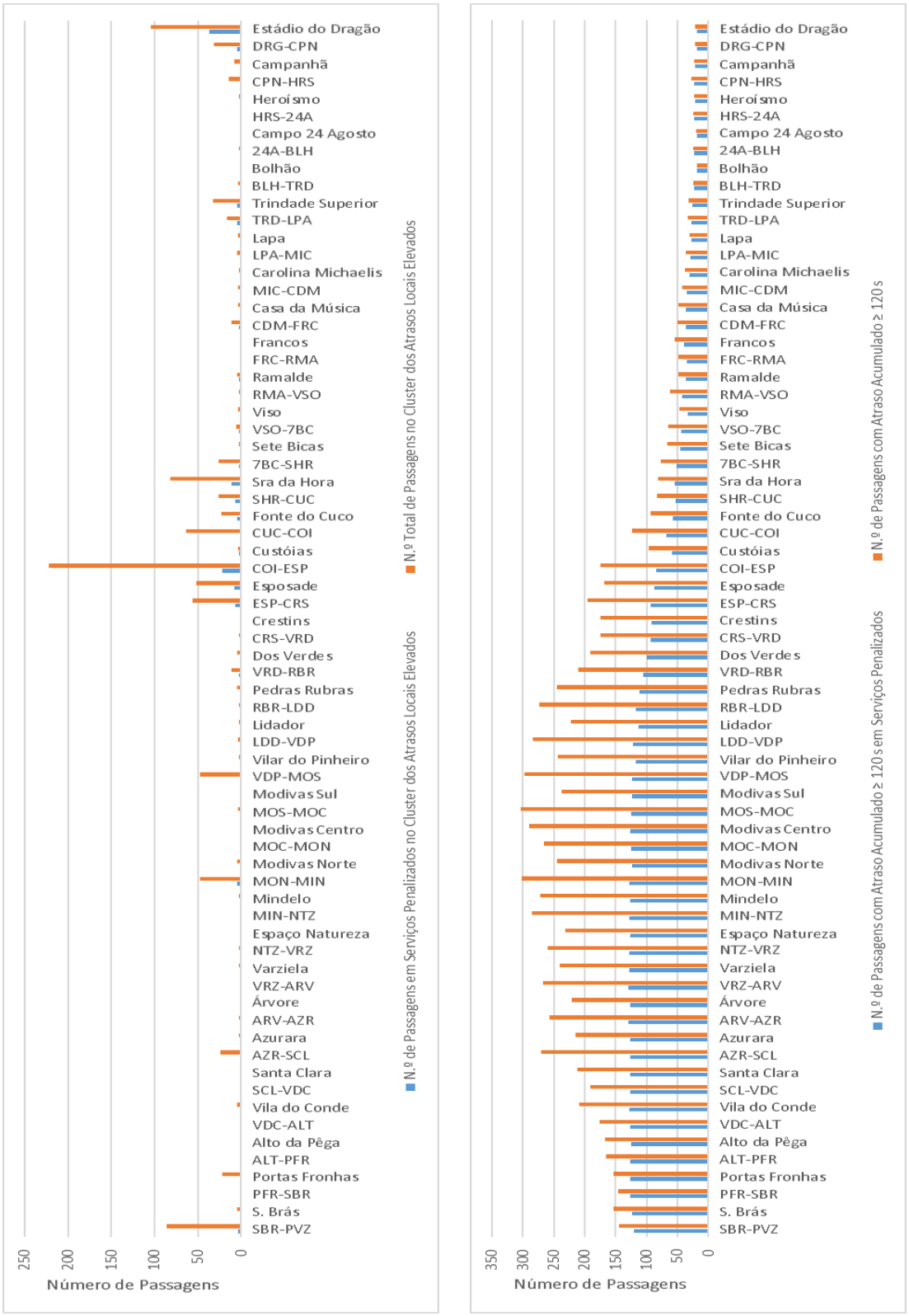


Figura A1.14 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa do Varzim (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

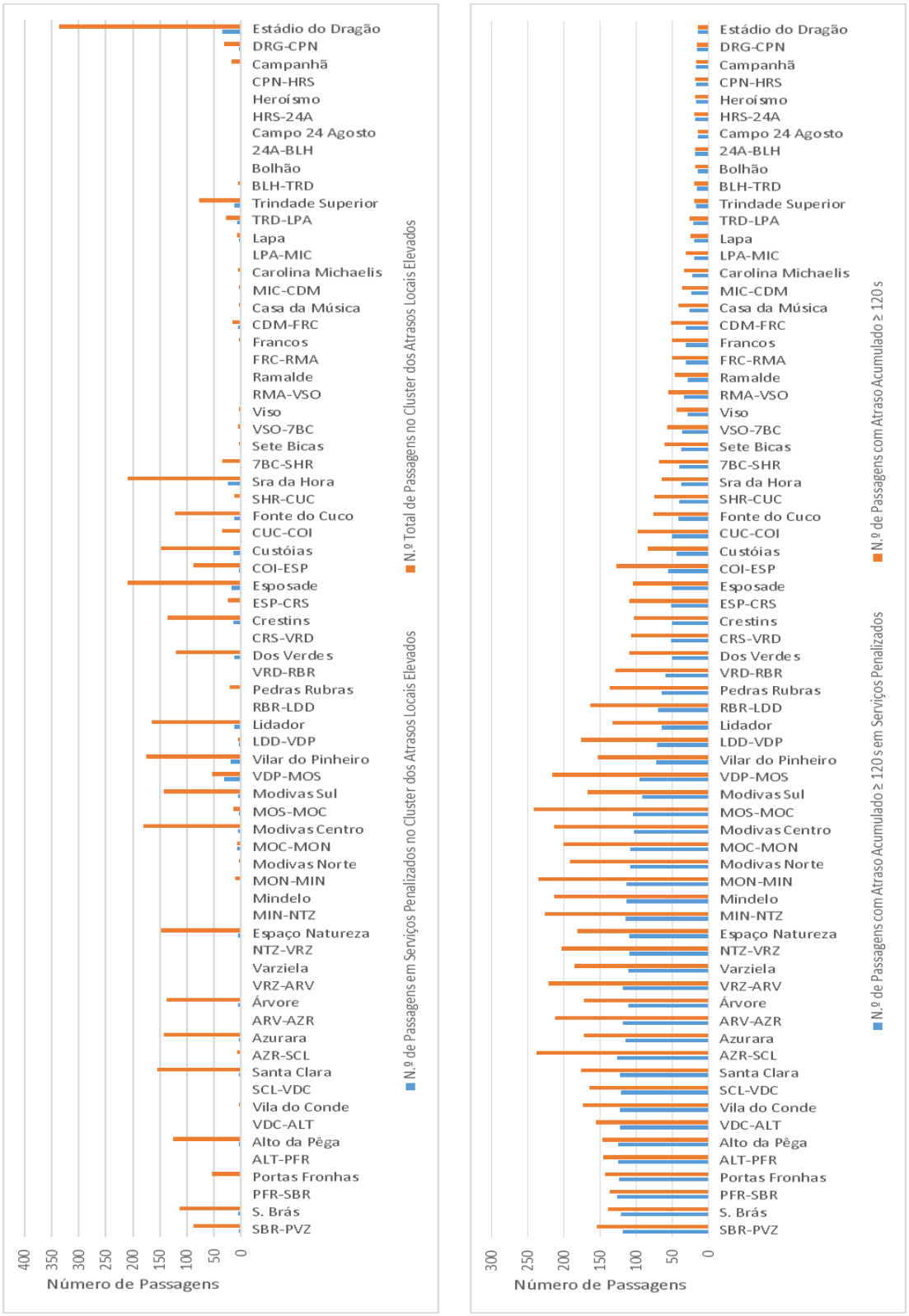


Figura A1.15 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa do Varzim (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

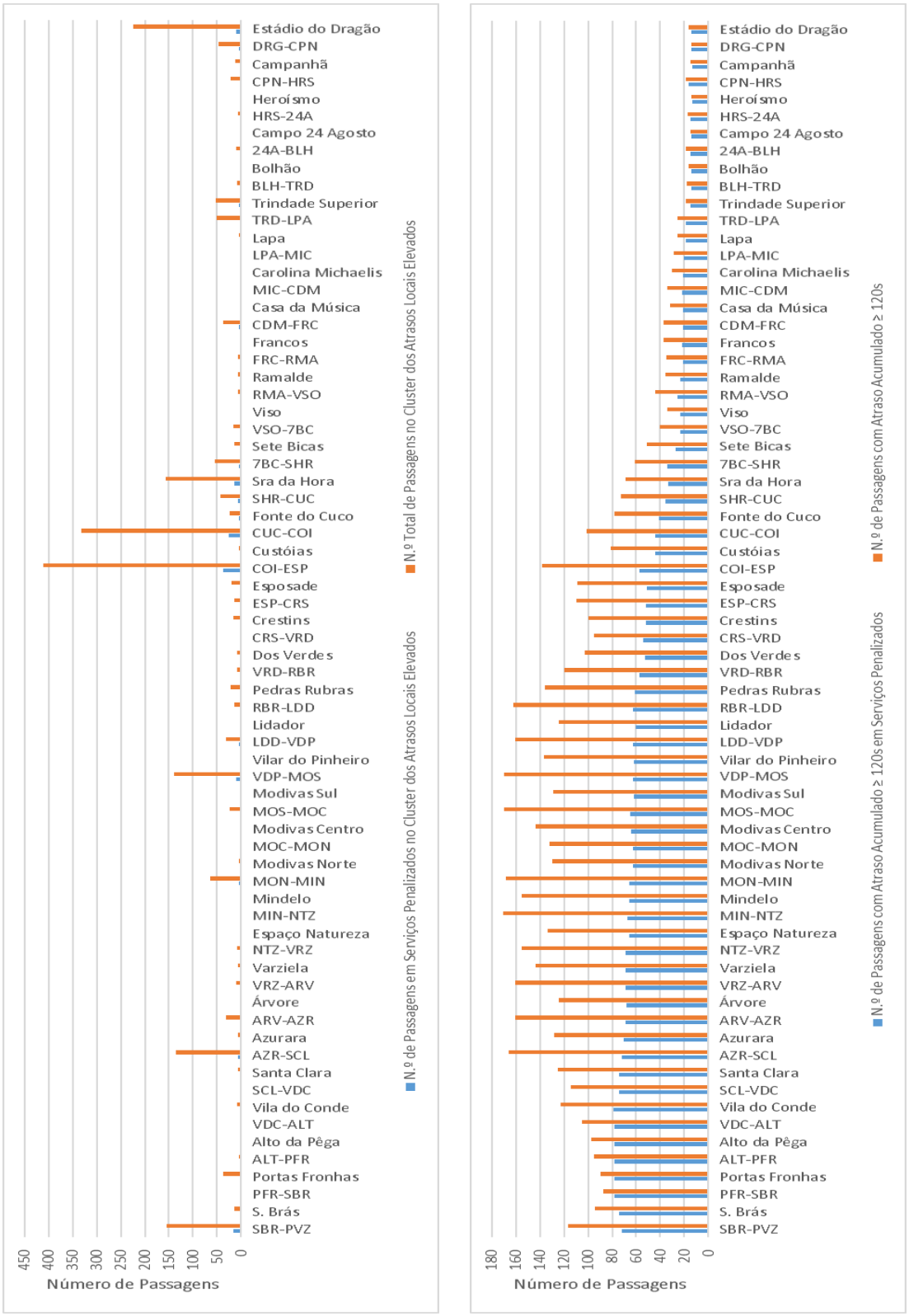


Figura A1.16 – Distribuição espacial dos atrasos na linha B, sentido Estádio do Dragão – Póvoa do Varzim (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

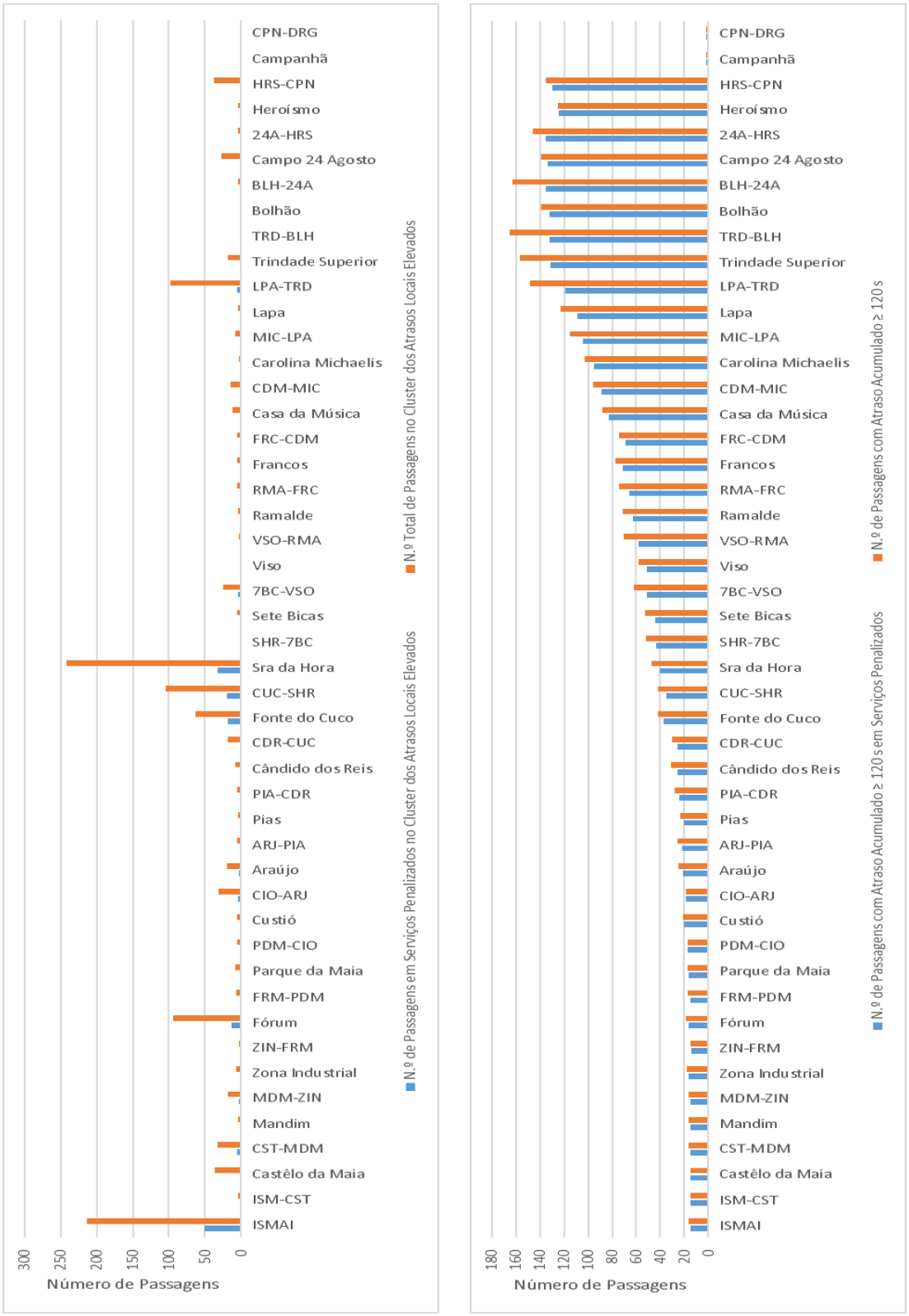


Figura A1.17 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI – Estádio do Dragão (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

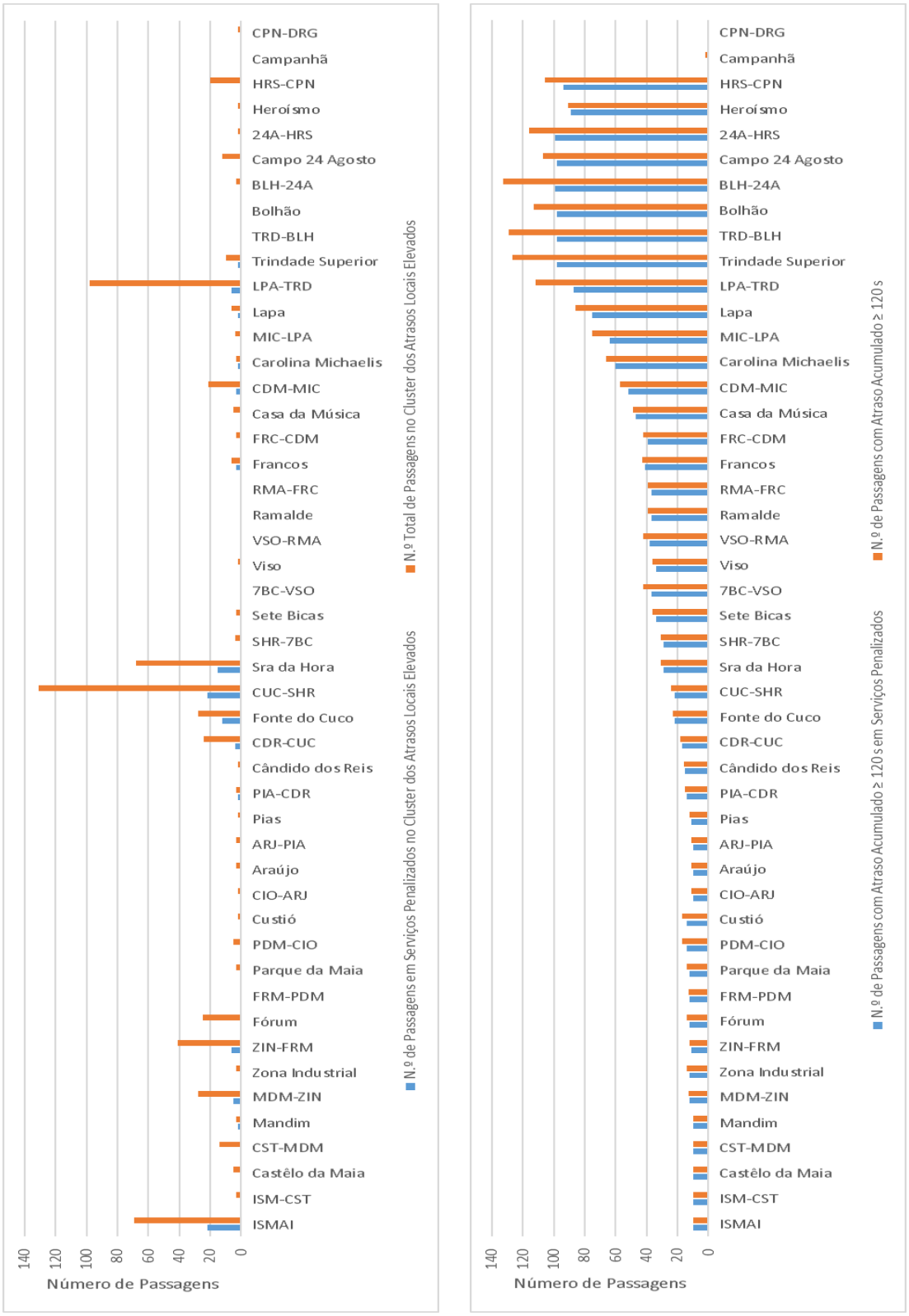


Figura A1.18 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI – Estádio do Dragão (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

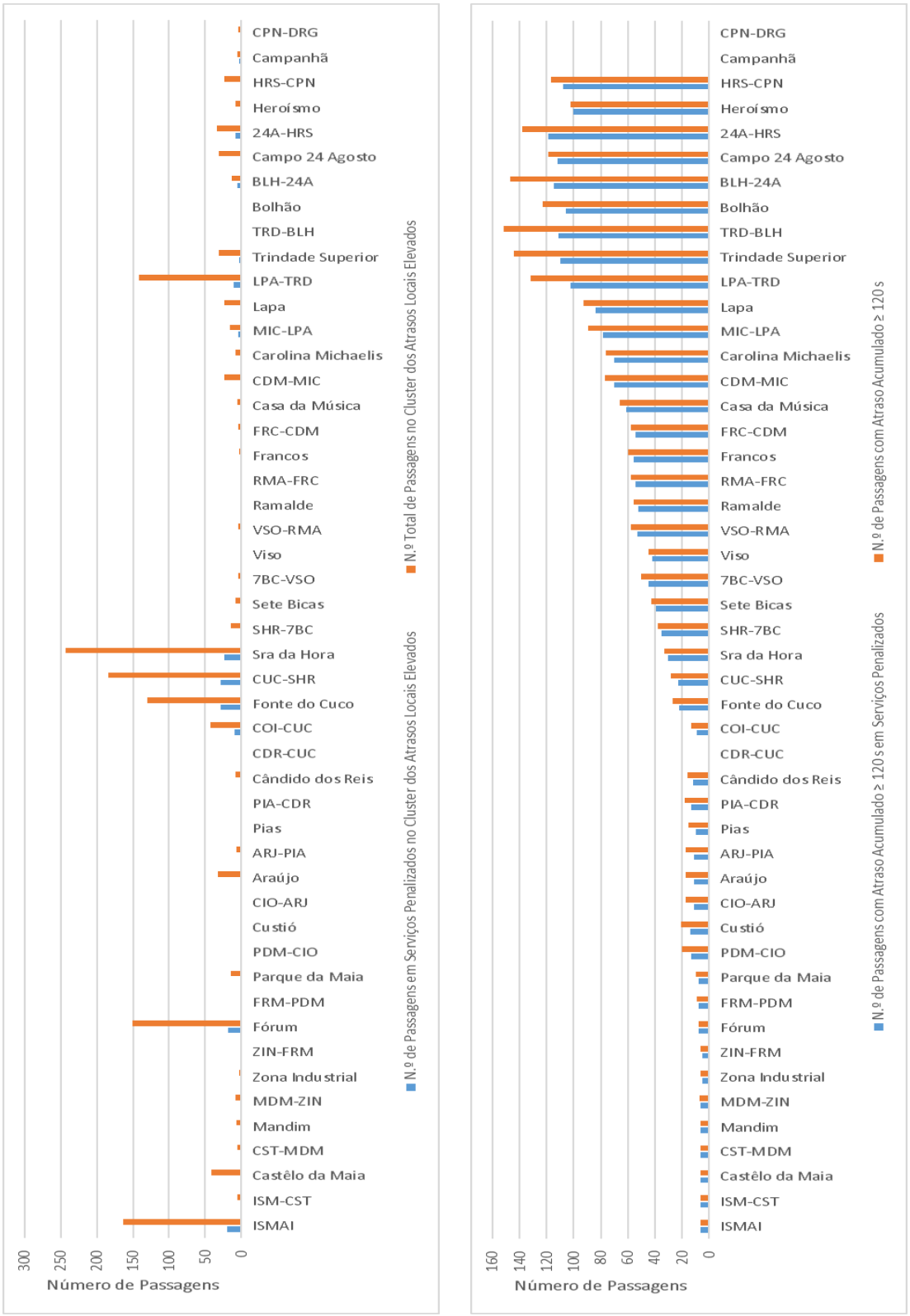


Figura A1.19 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI – Estádio do Dragão (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

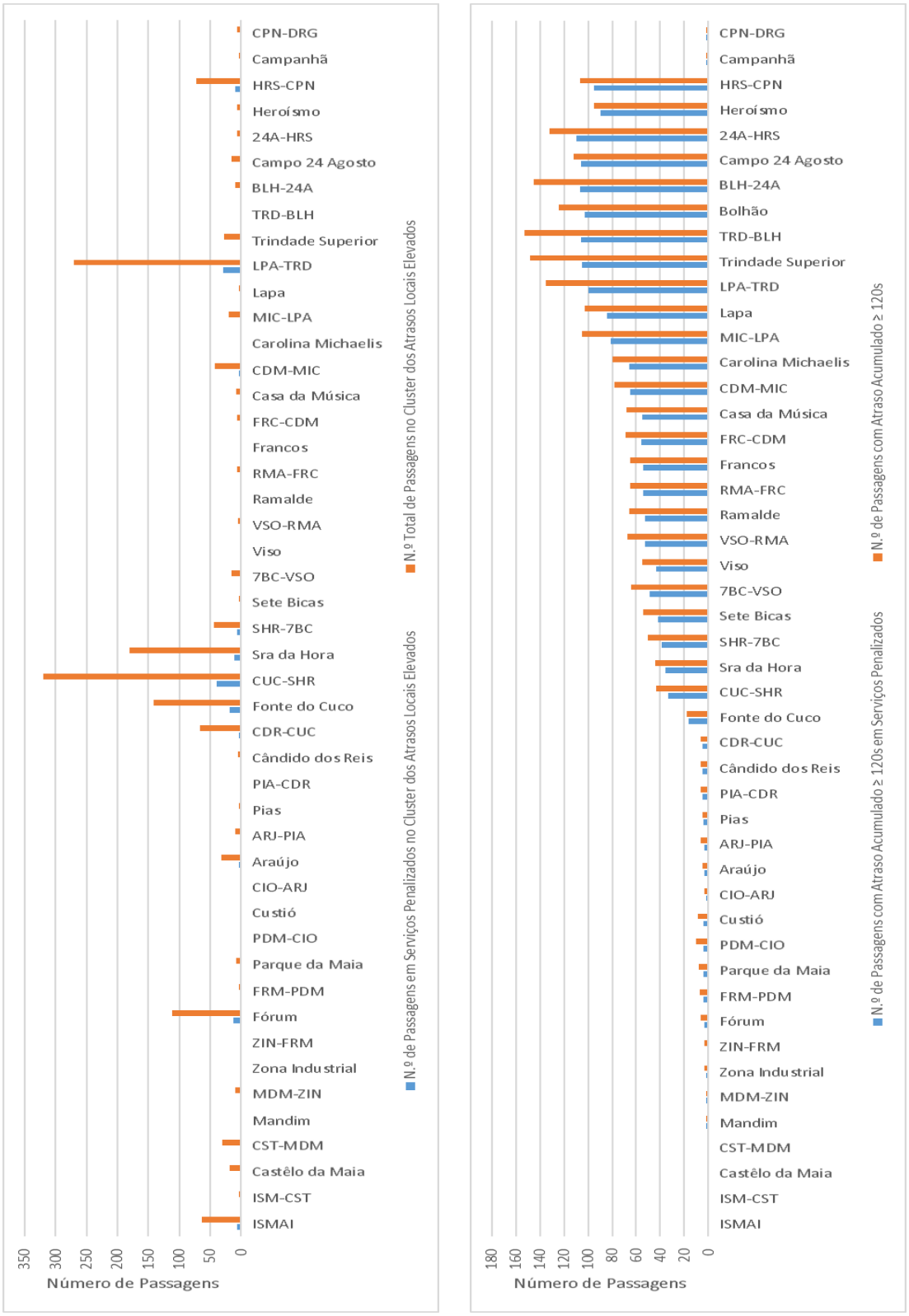


Figura A1.20 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido ISMAI – Estádio do Dragão (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

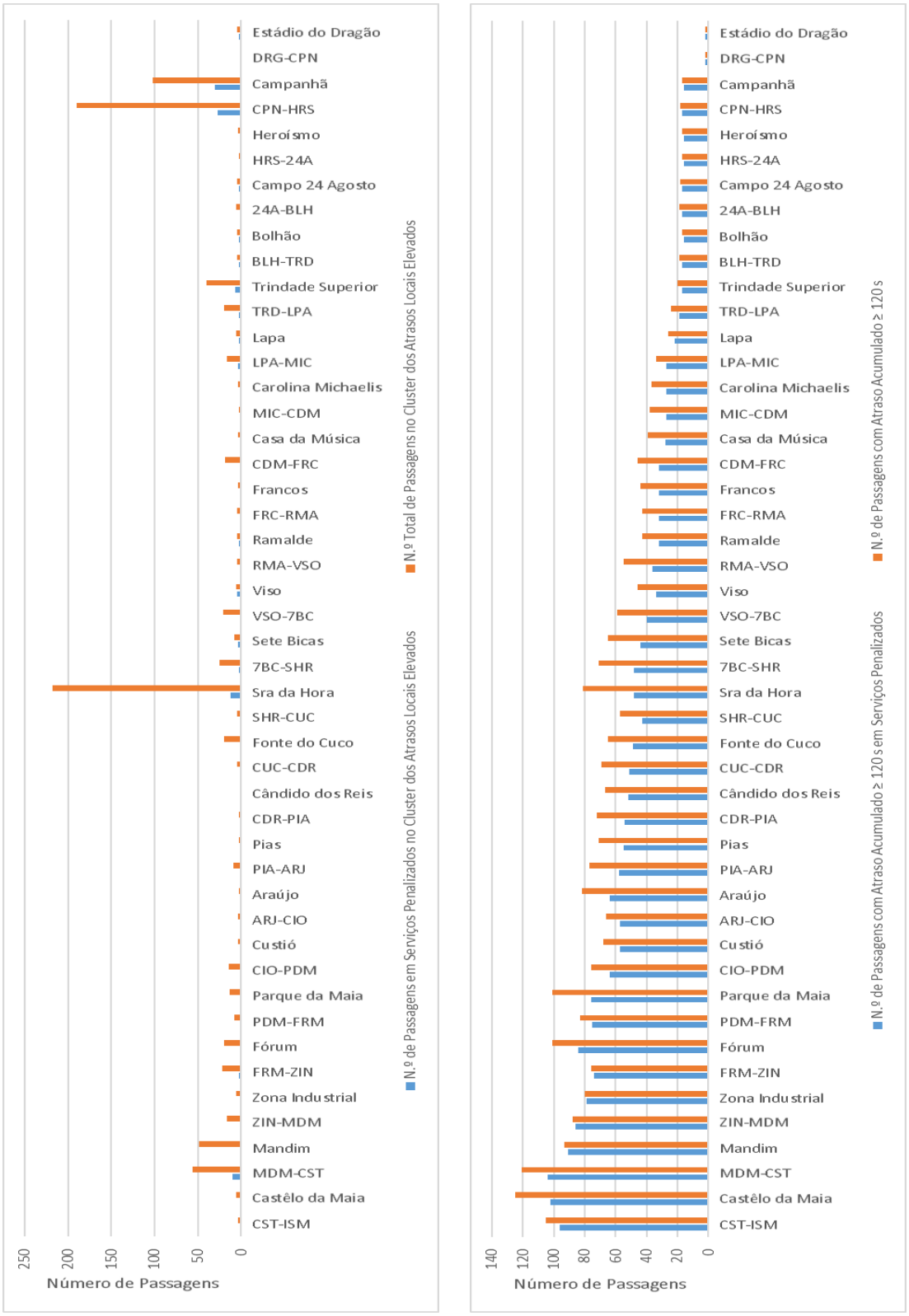


Figura A1.21 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Estádio do Dragão – ISMAI (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

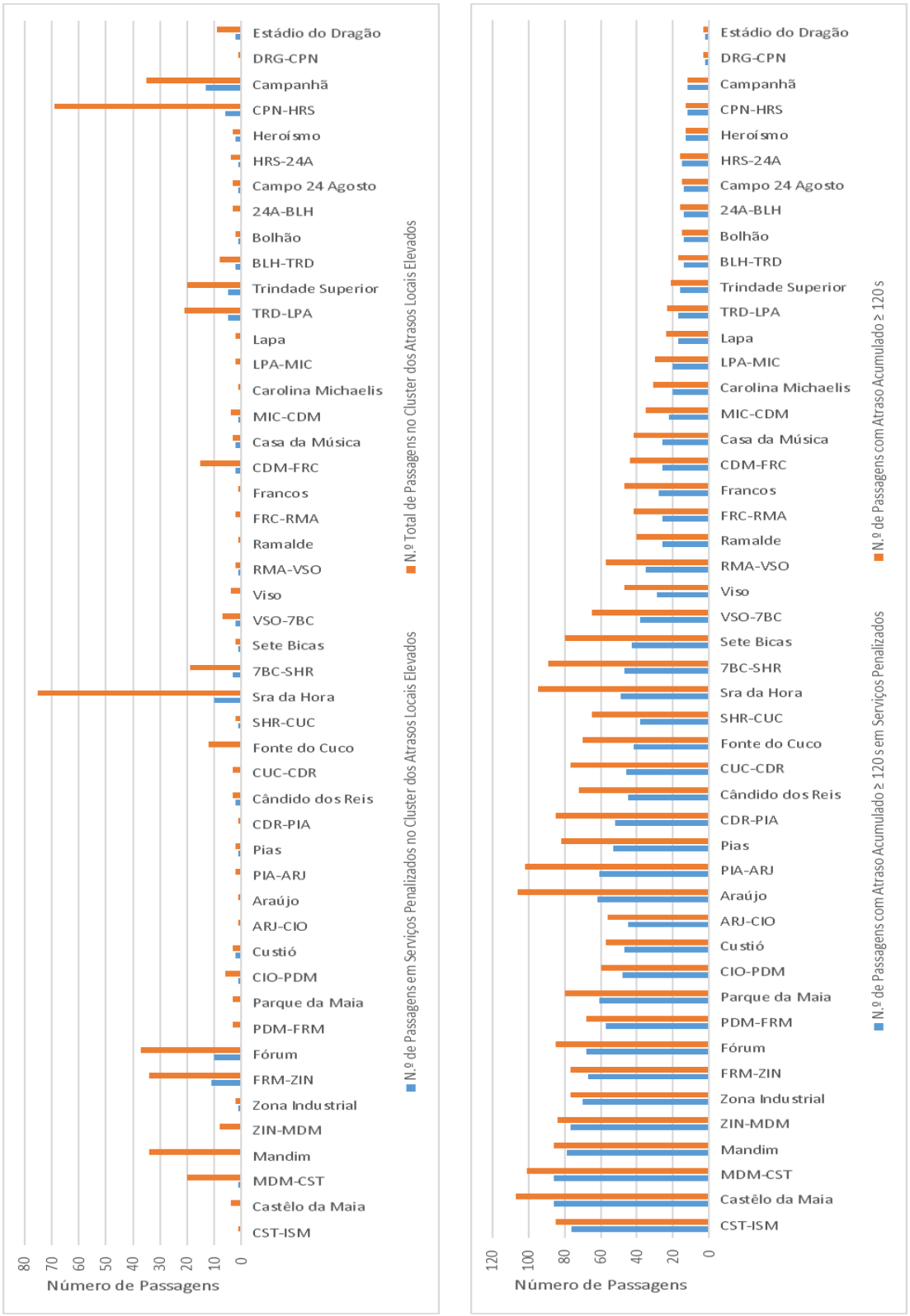


Figura A1.22 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Estádio do Dragão – ISMAI (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

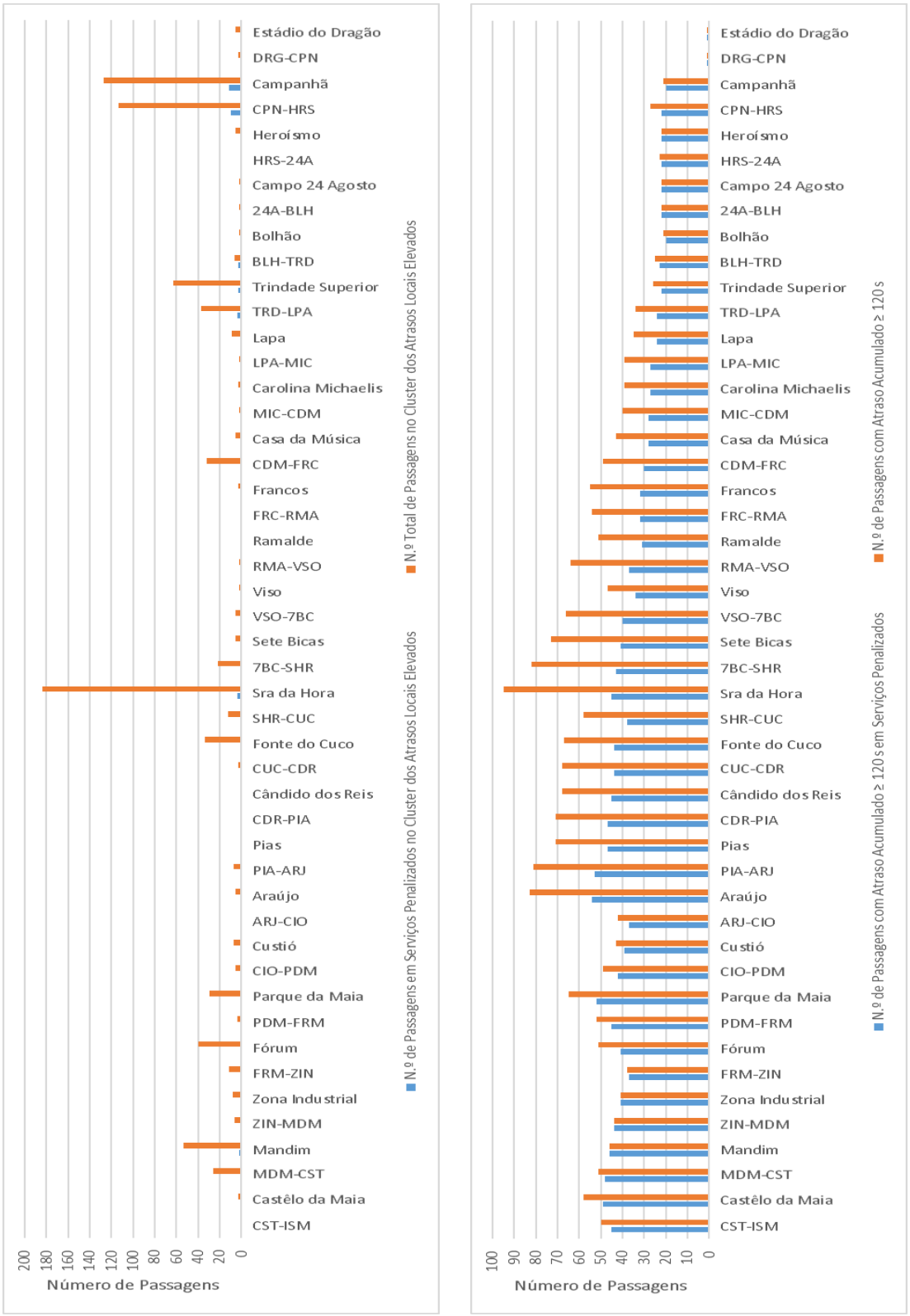


Figura A1.23 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Estádio do Dragão – ISMAI (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

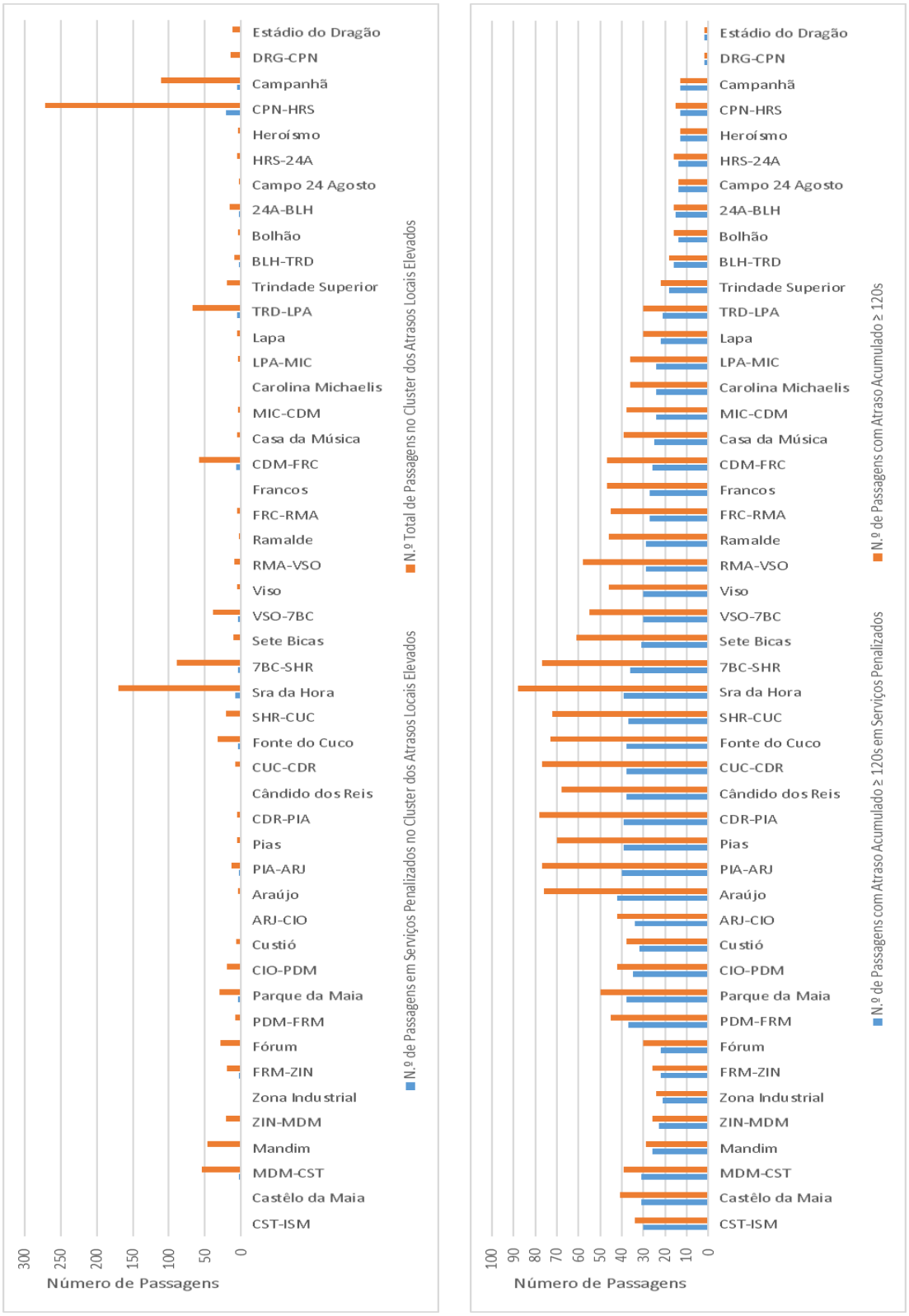


Figura A1.24 – Distribuição espacial dos atrasos na linha C, sentido Estádio do Dragão – ISMAI (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

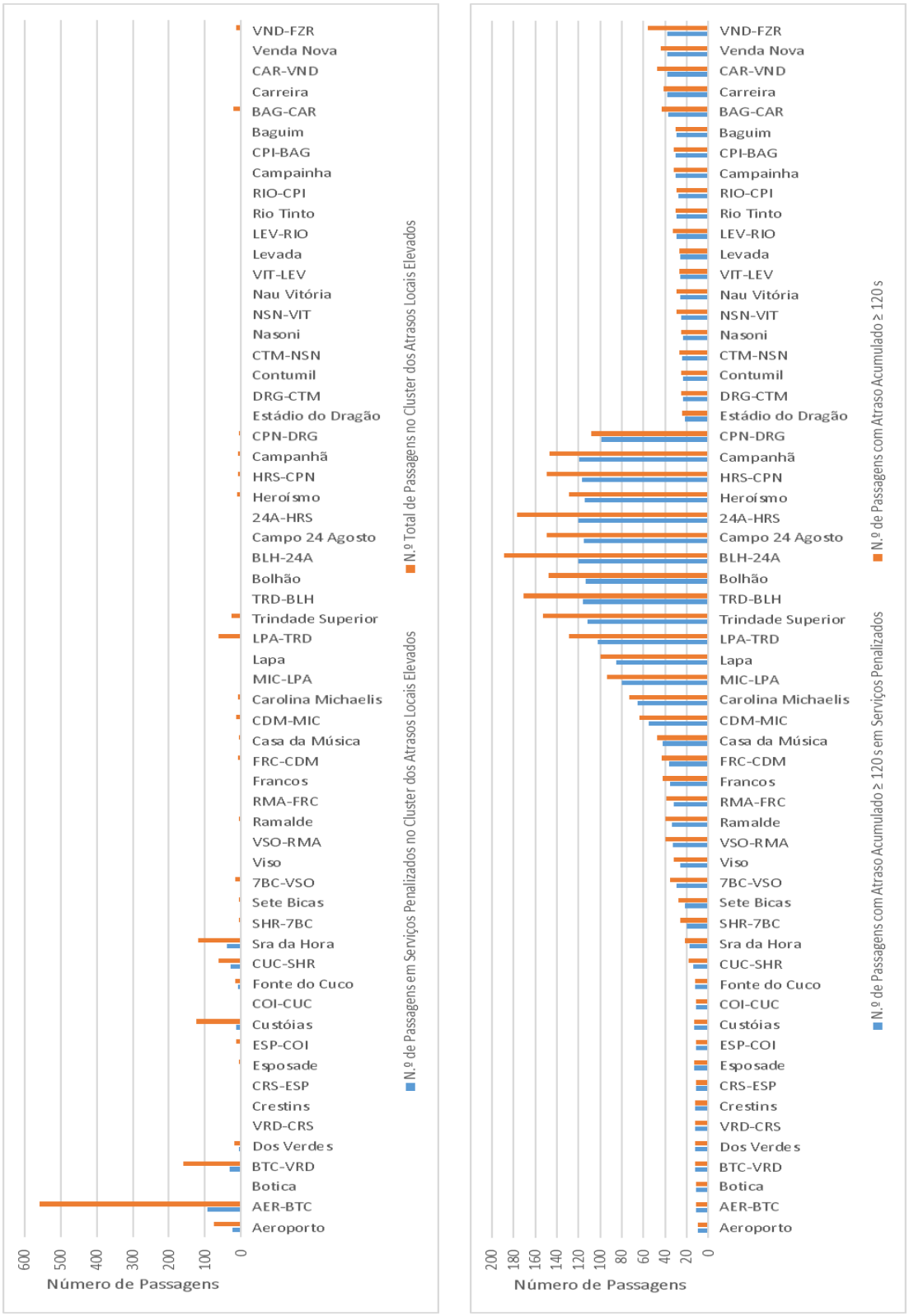


Figura A1.25 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto – Fânzeres (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

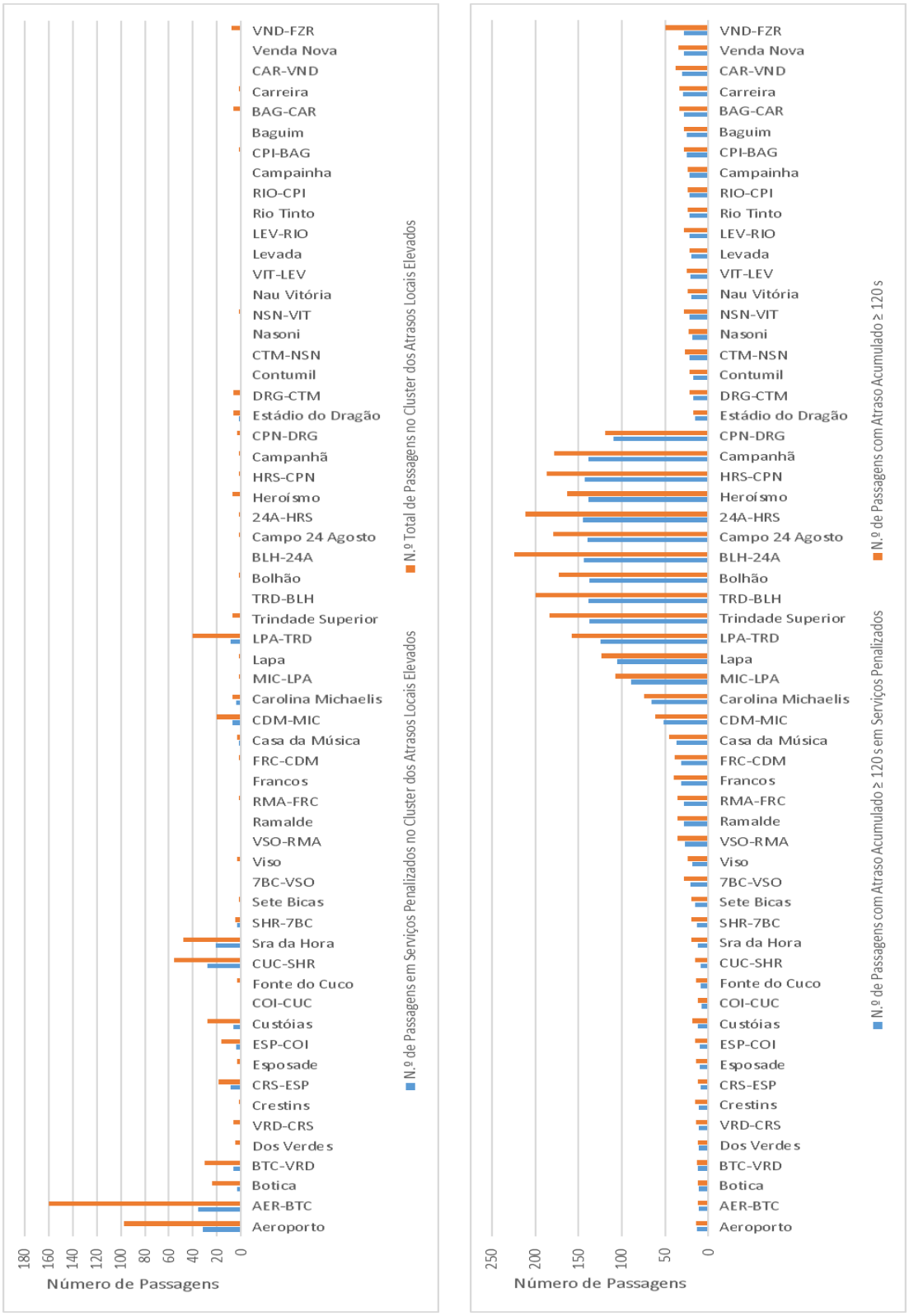


Figura A1.26 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto – Fânzeres (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

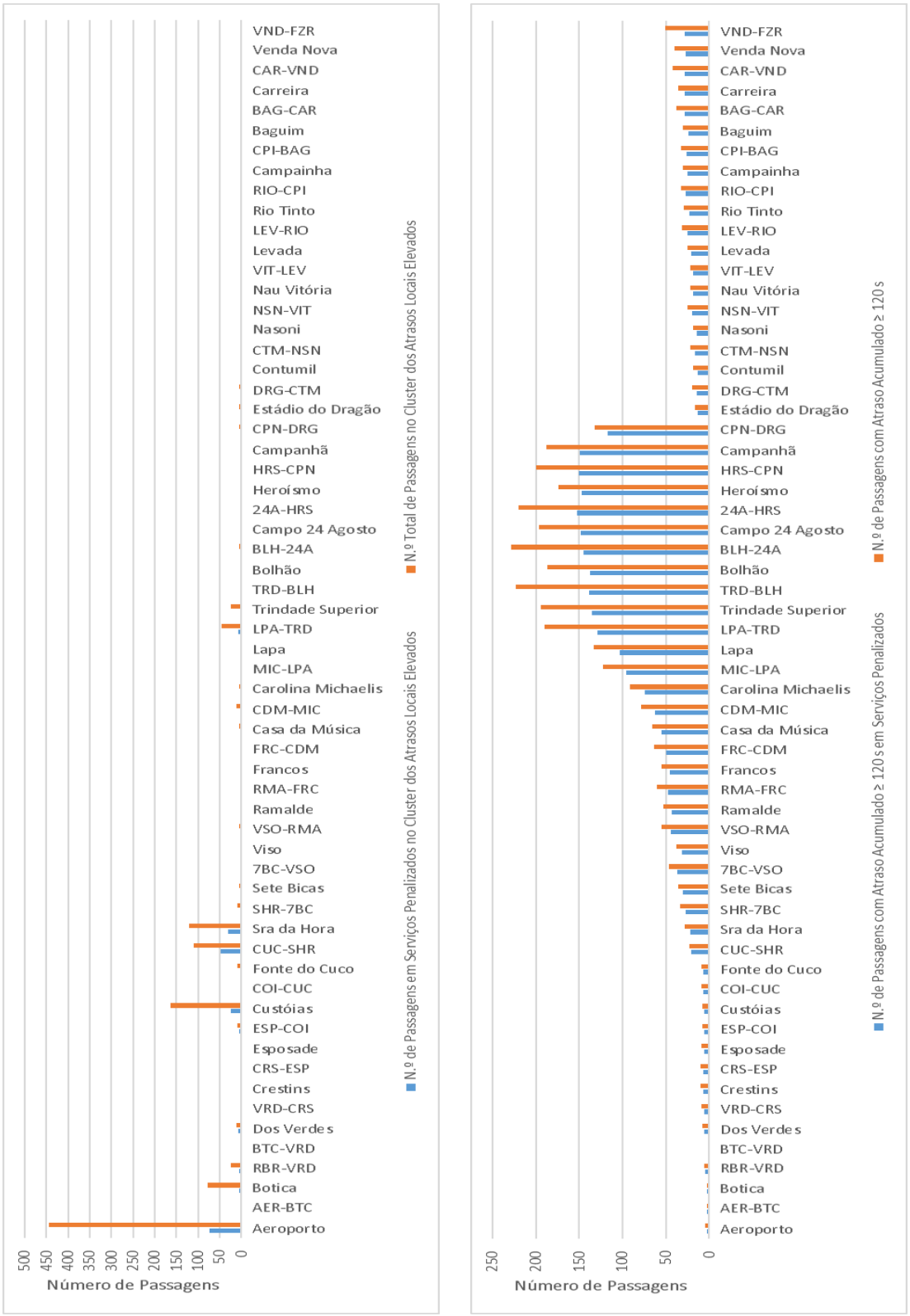


Figura A1.27 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto – Fânzeres (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

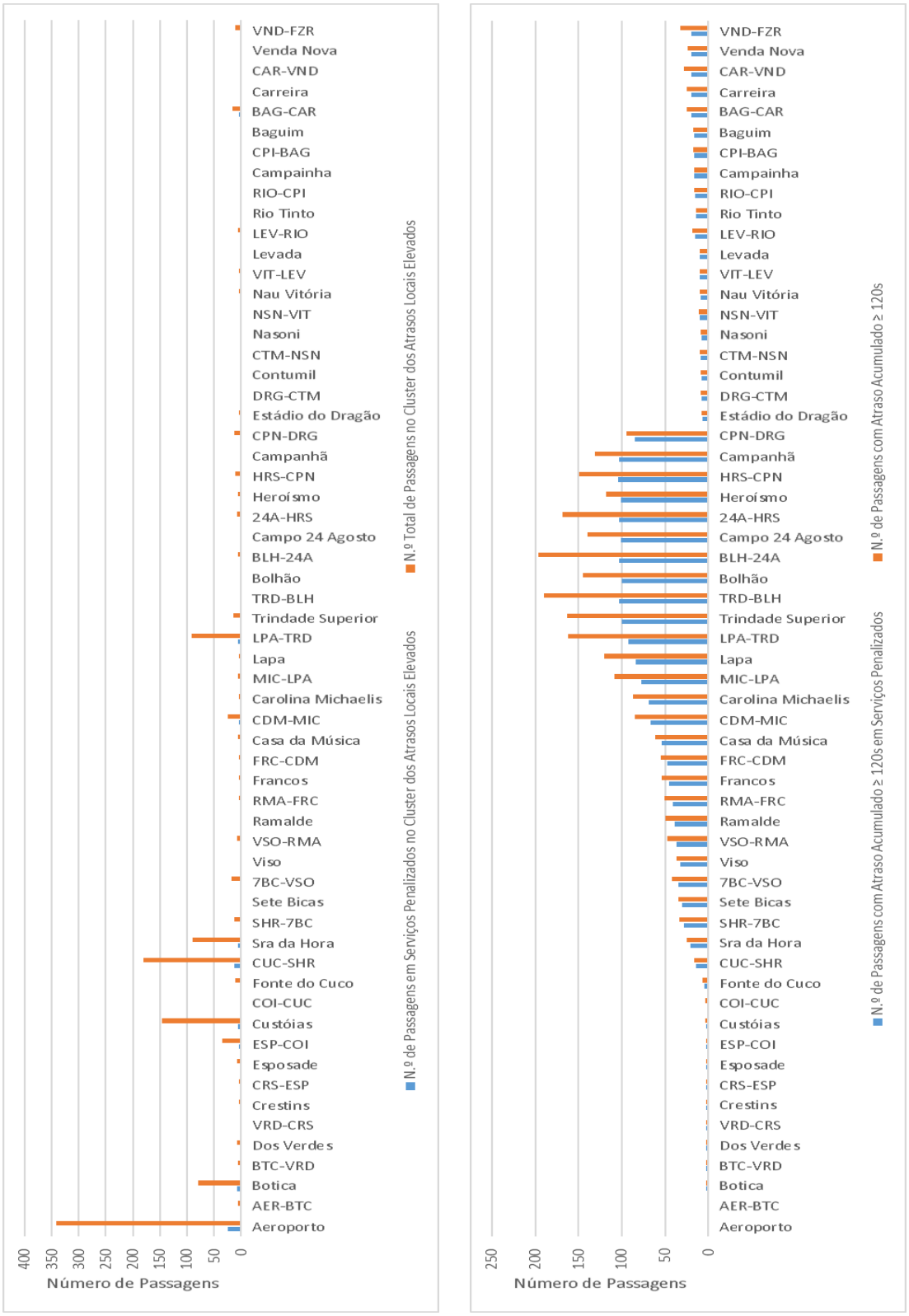


Figura A1.28 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Aeroporto – Fânzeres (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

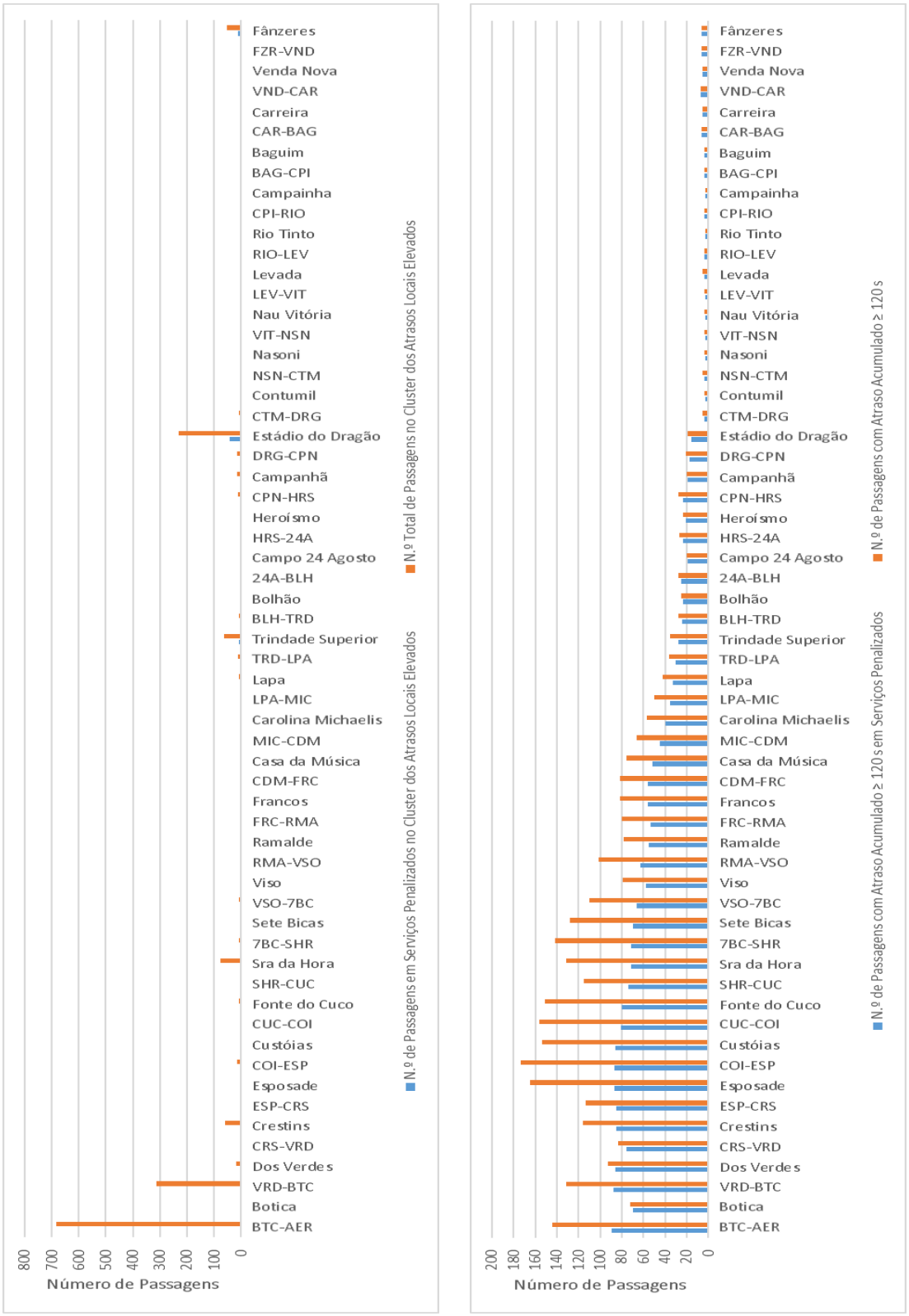


Figura A1.29 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres - Aeroporto (abril de 2018, exceto quartas-feiras)

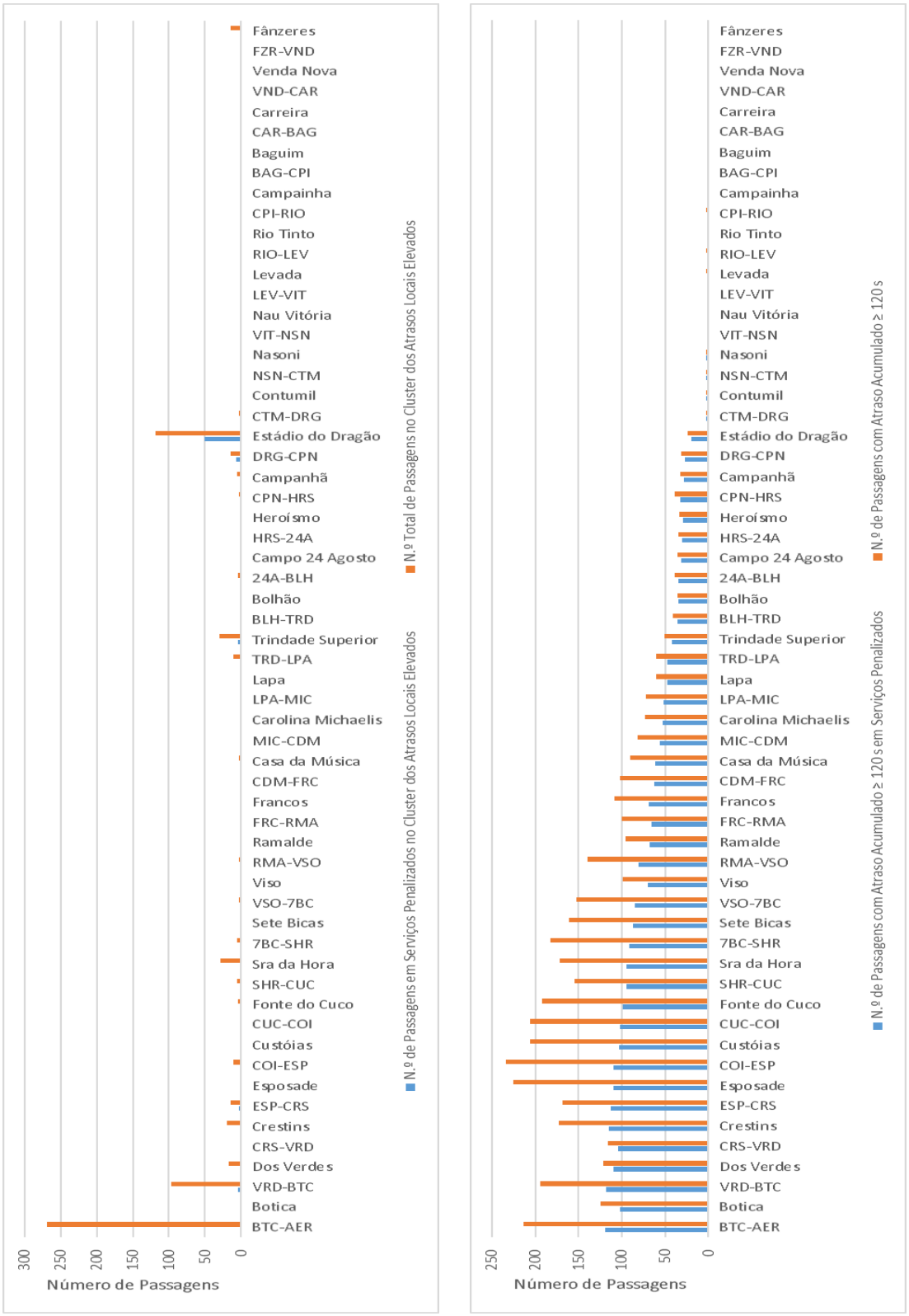


Figura A1.30 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres - Aeroporto (maio de 2018, exceto quartas-feiras)

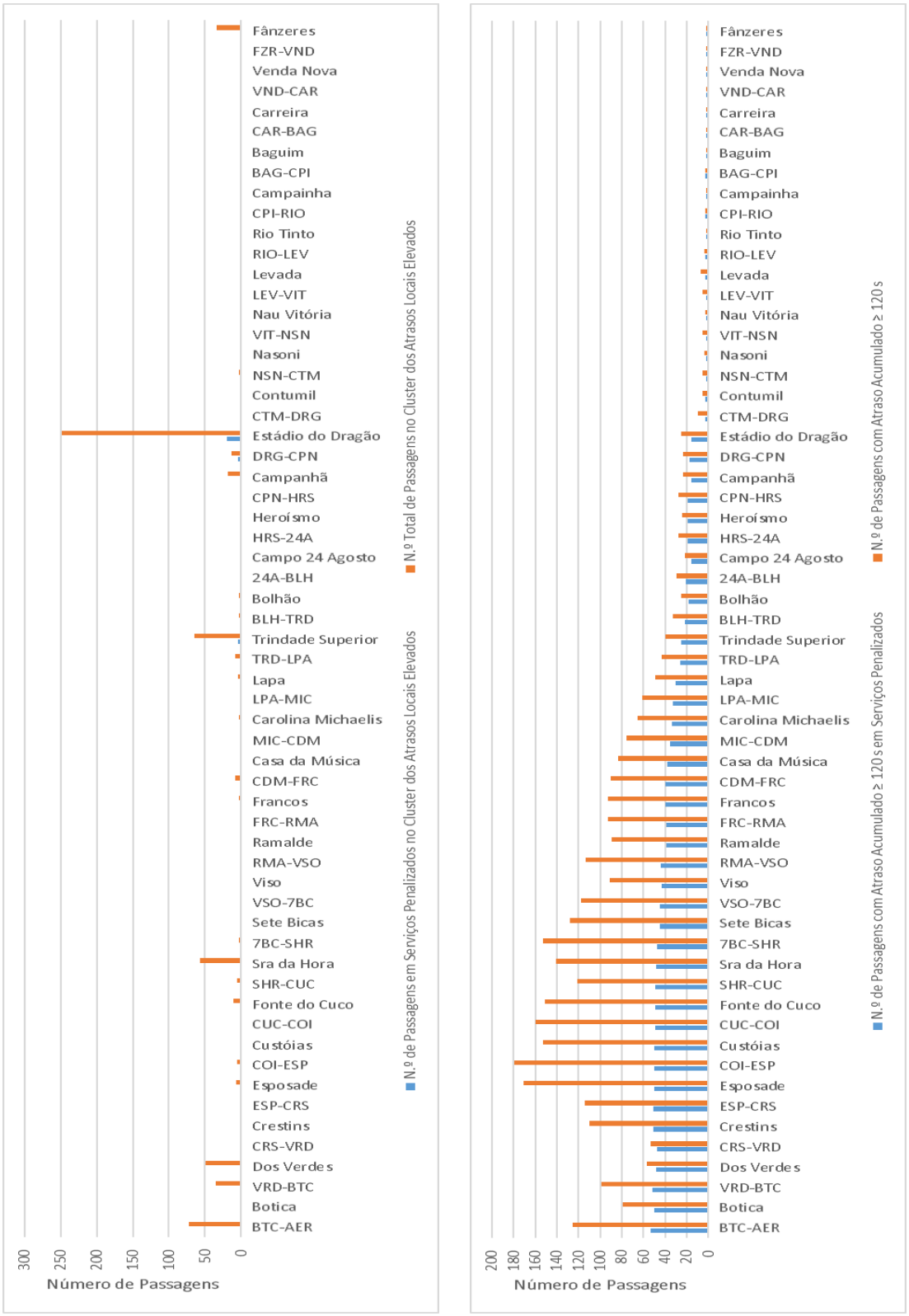


Figura A1.31 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres - Aeroporto (julho de 2018, exceto quartas-feiras)

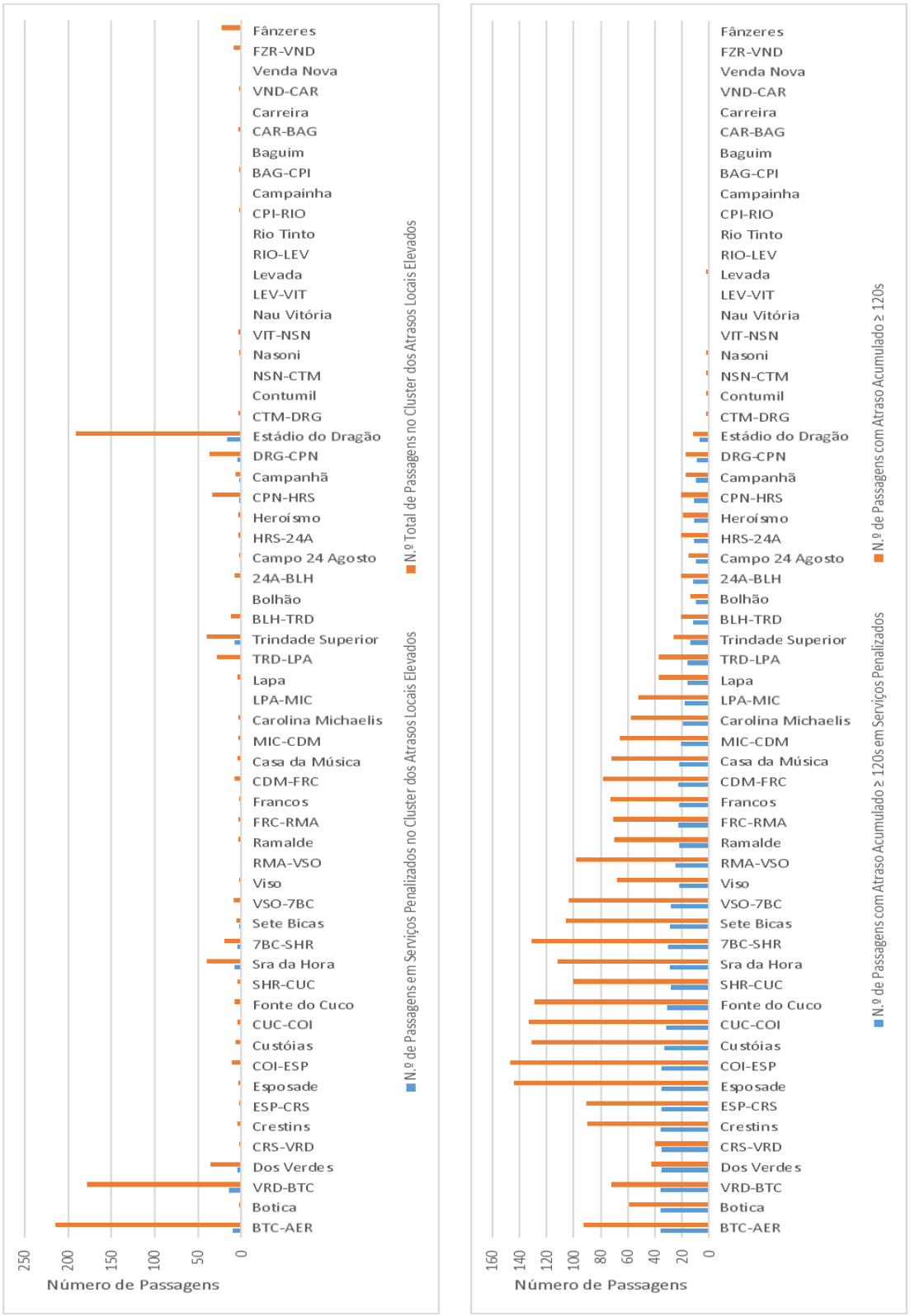


Figura A1.32 – Distribuição espacial dos atrasos na linha E, sentido Fânzeres - Aeroporto (agosto de 2018, exceto quartas-feiras)

A2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DESAJUSTES DOS INTERVALOS DE PASSAGEM

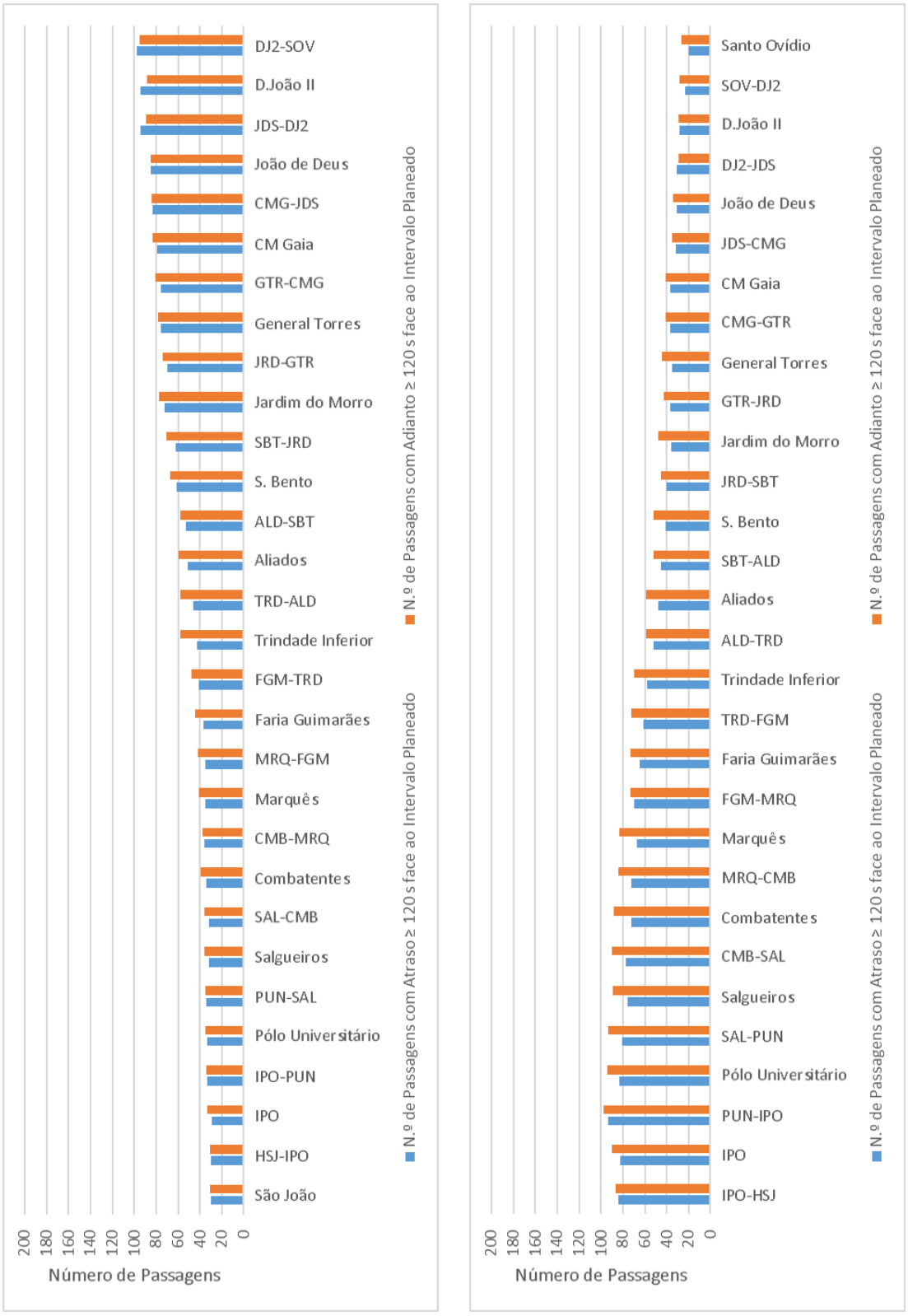


Figura A2.1 – Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em abril de 2018 (exceto quartas-feiras)

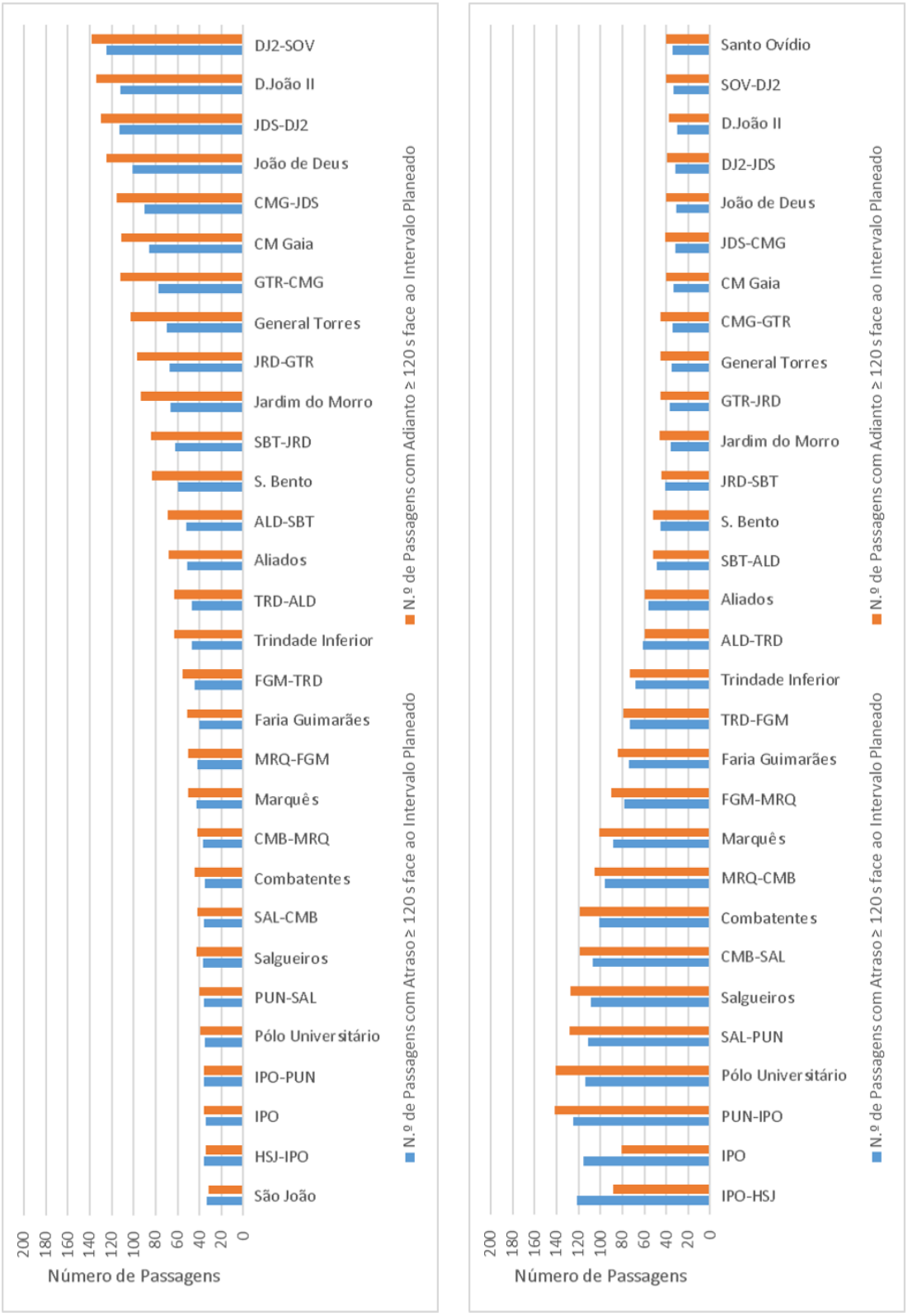


Figura A2.2 – Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em maio de 2018 (exceto quartas-feiras)

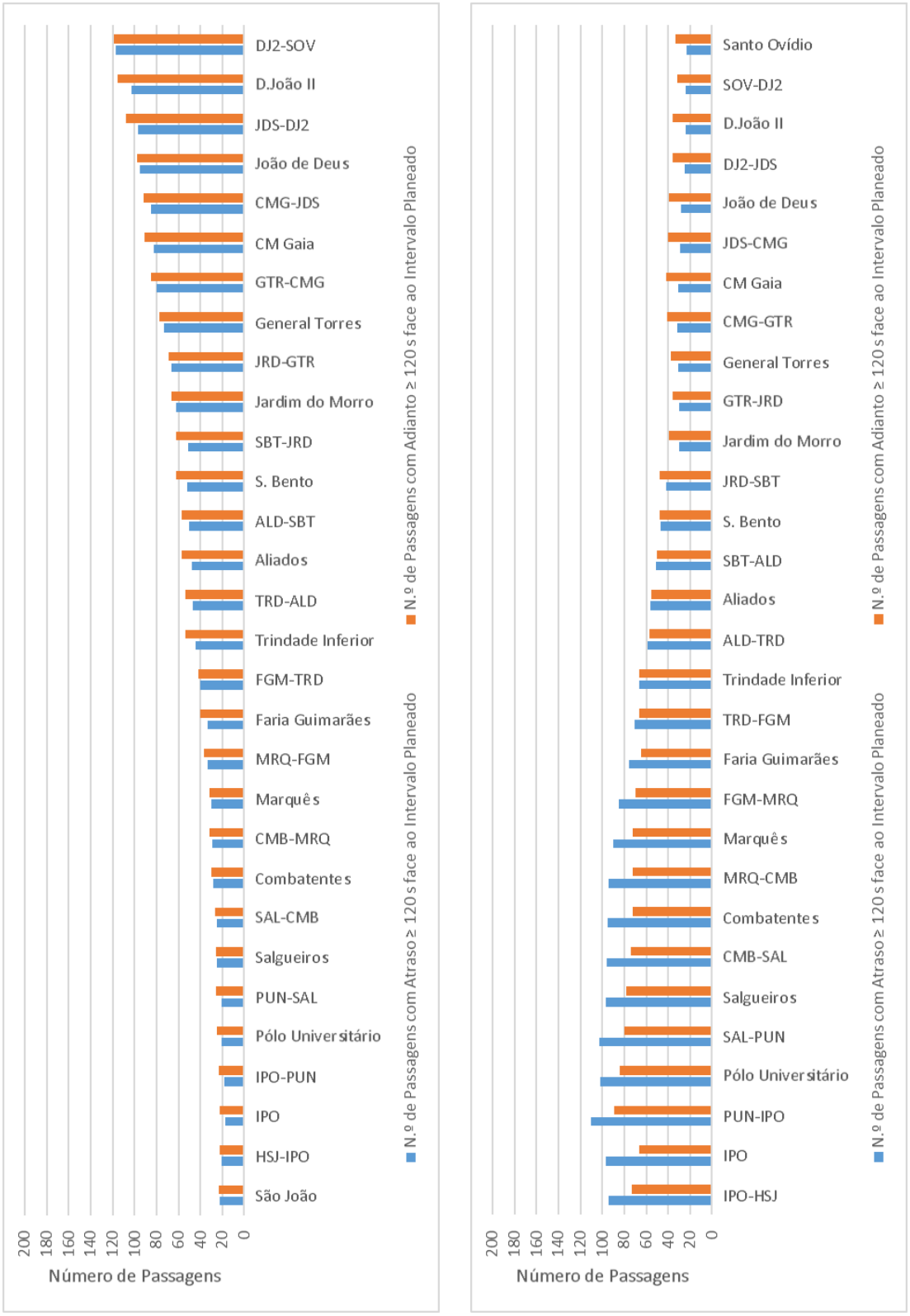


Figura A2.3 – Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em junho de 2018 (exceto quartas-feiras)

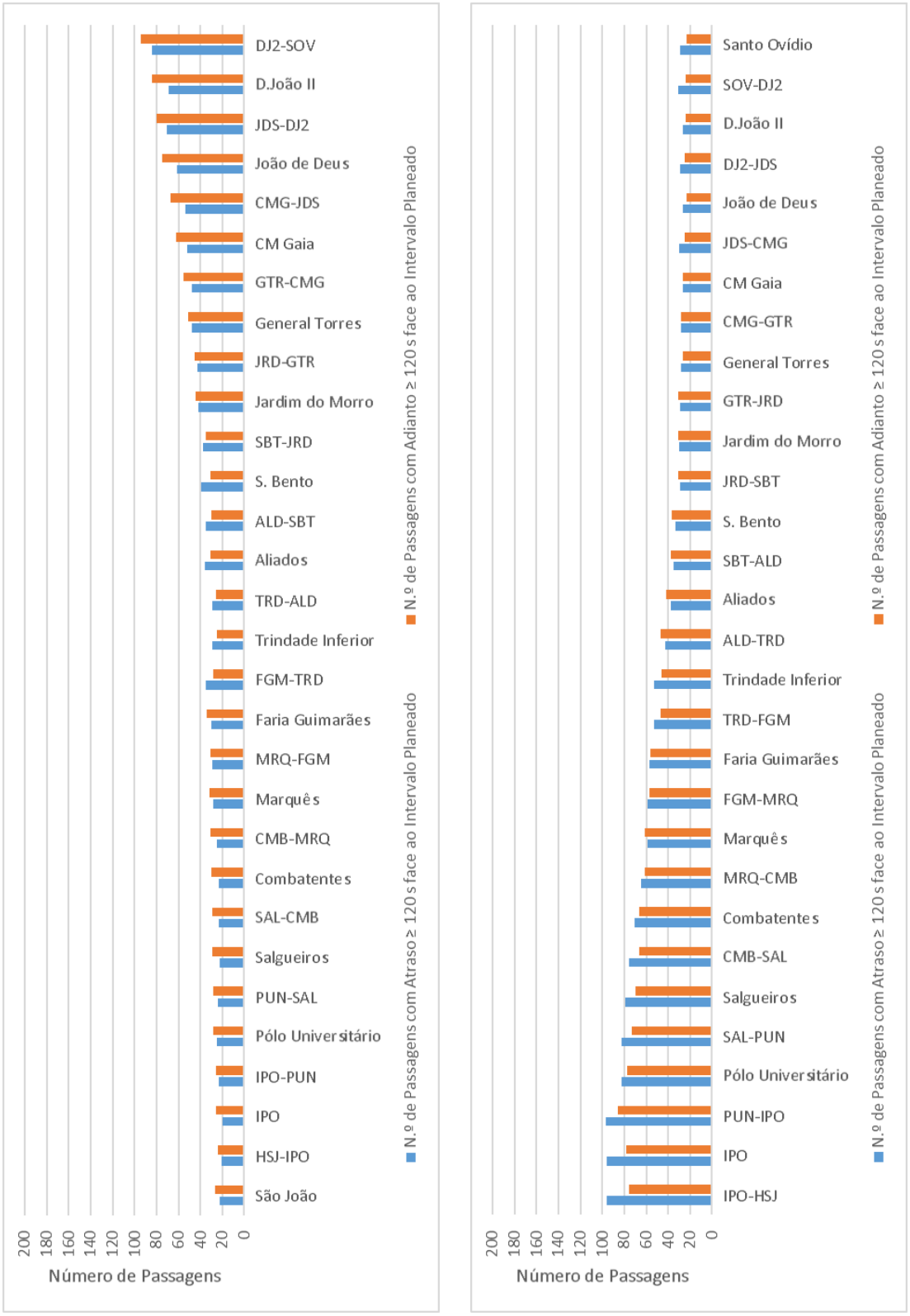


Figura A2.4 – Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em julho de 2018 (exceto quartas-feiras)

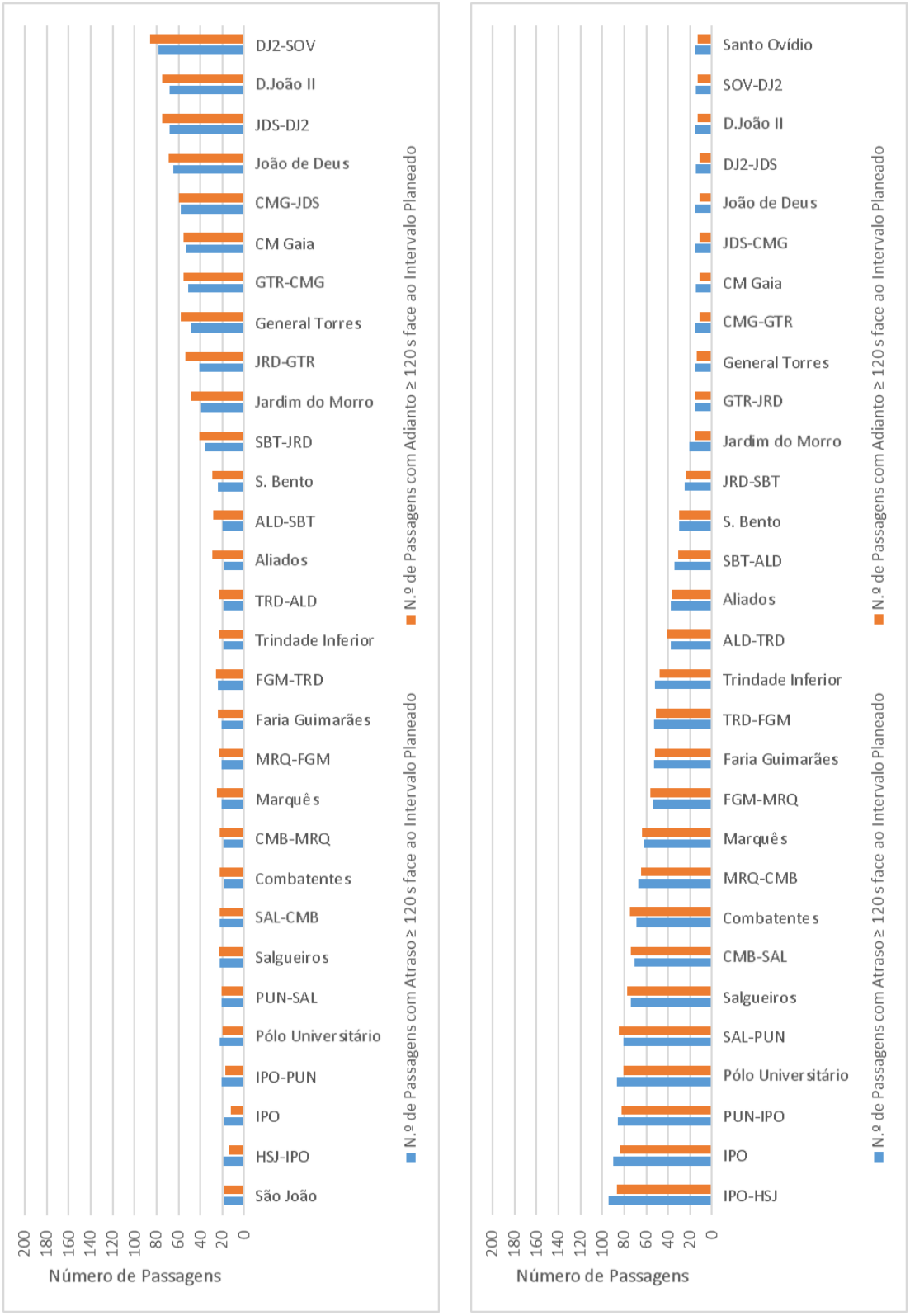


Figura A2.5 – Distribuição espacial dos elevados desajustes dos intervalos de passagem na linha D, sentido Hospital São João – Santo Ovídeo (esquerda) e inverso (direita), em agosto de 2018 (exceto quartas-feiras)