

BUS BUNCHING: O CASO DA LINHA 758 DA CARRIS

João Petinga Almeida¹, Guilherme Ramos², João de Abreu e Silva³ e Filipe Moura⁴

¹ Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), Departamento de Engenharia Civil, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, email: joao.petinga.almeida@tecnico.ulisboa.pt

² Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

³ Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), Doutorado em Sistemas de Transportes, CERiS, Professor Associado; Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, Telefone: 218 418 302, email joao.abreu.silva@tecnico.ulisboa.pt

⁴ Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), Doutorado em Sistemas de Transportes, CERiS, Professor Associado; Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, Telefone: 218 418 371, email fmoura@tecnico.ulisboa.pt

Sumário

Os operadores de transporte rodoviário coletivo têm procurado melhorar a qualidade do seu serviço. O nível de serviço fornecido depende, em grande parte, da capacidade de operar segundo o planeamento pré-definido. No entanto, os serviços de autocarro (sobretudo em carreiras com maior frequência) nem sempre conseguem garantir o diagrama de marcha previsto. Um dos problemas associados à irregularidade extrema é a ocorrência de bus bunching. O objetivo deste trabalho é construir um modelo de deteção desse fenómeno em carreiras em ambiente urbano com base na análise dos respetivos dados de GPS, aplicado ao caso da operação da CARRIS.

Palavras-chave: bus bunching; regularidade do serviço; fiabilidade; controlo de *headways*; transporte público; pontualidade

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios que os operadores de transportes públicos (TP) rodoviários enfrentam é o de oferecer serviço fiável num ambiente de operação dinâmico. Em diversas zonas, os serviços estão sujeitos a atrasos e interrupções devido a congestionamentos de trânsito, condições climáticas e avarias de veículos, entre outros eventos [1].

Os atrasos afetam negativamente o número de passageiros [2]. De facto, os passageiros reconhecem a pontualidade e a fiabilidade dos horários como dois dos fatores mais críticos que afetam o seu uso de TP rodoviários [3].

A correspondência entre o planeamento e as operações está na base da fiabilidade do serviço: os operadores de TP disponibilizam uma rede e um horário, a sua promessa ao cliente. O cumprimento desta promessa nos diversos pontos define o quão fiável é o serviço de TP que disponibilizam [4].

Idealmente, os autocarros encontrar-se-iam igualmente espaçados na sua linha, refletindo-se em intervalos regulares de chegadas a cada paragem. Porém, esta situação é rara, mesmo não existindo desvios de *headway* no terminal de partida.

Uma das consequências extremas de um serviço de TP rodoviários irregular é o *bus bunching* (BB), situação em que pelo menos dois autocarros chegam à mesma paragem em simultâneo. Este fenómeno de BB pode ser trivialmente explicado como: se um autocarro se encontra ligeiramente atrasado em relação ao autocarro antecessor na mesma linha, então mais passageiros embarcarão nesse autocarro numa dada paragem, tornando o embarque mais moroso que o previsto. Por outro lado, o autocarro sucessor encontrará menos passageiros nessa paragem e, por conseguinte, ganhará

tempo e espaço relativamente ao autocarro que o precede [5]. Esta situação pode propagar-se pelas paragens subsequentes e levar a uma *headway* próxima de zero, ou mesmo zero, entre autocarros.

O problema de BB é um paradigma de um ciclo que se auto reforça: se não forem tomadas medidas, o efeito escalará pela linha culminando na criação de pelotões de autocarros [6]. Como efeito direto, o tempo de espera médio dos passageiros aumenta, bem como o desconforto a bordo devido à sobrecarga nos autocarros atrasados.

As ocupações irregulares de passageiros refletem-se numa fraca utilização da capacidade, traduzindo-se numa diminuição de desempenho dos TP do lado dos operadores: quando o BB ocorre, a um autocarro sobrelotado segue-se um autocarro quase vazio, levando a um desperdício de recursos e a uma gestão de tripulação pouco eficiente e, logo, a um aumento de custos operacionais para o operador.

Esta irregularidade resulta, ainda, numa menor hipótese de um passageiro encontrar um lugar sentado ou ainda de lhe ser recusada a entrada no veículo, o que é frustrante para os passageiros [4]. As agências de TP rodoviários podem, por isso, perder clientes habituais devido a estes fenómenos, o que diminui o seu lucro [1].

De facto, um serviço de TP rodoviário eficaz e eficiente é indispensável para reduzir o congestionamento de tráfego, as emissões poluentes, o consumo de energia e a dependência de modos privados em áreas urbanas [7].

Os indicadores de desempenho da Carris (o operador de TP rodoviário de Lisboa) fornecem resultados preocupantes: a procura total diminuiu gradualmente de 256,6 para 140,6 milhões de passageiros entre 2004 e 2016 (o que representa uma variação de 45%) e a oferta (lugares \times Km) foi reduzida pela empresa em cerca de 32%.

A fim de aumentar os níveis de procura da Carris, é importante compreender as causas subjacentes da perda de fiabilidade do seu serviço. Sendo que a prevalência de BB é uma das provas mais visíveis da não fiabilidade do serviço [8], este trabalho tem como objetivo desenvolver um método para detetar ocorrências de BB e calcular os indicadores de desempenho mais relevantes da regularidade do sistema. Neste artigo, são explorados os usos potenciais dos sistemas de localização automática de veículos (AVL) para melhor compreender a operação nas linhas de autocarros e a dinâmica da fiabilidade do serviço.

O objetivo desta investigação é fornecer à Carris (e possivelmente a outras companhias de TP rodoviário) um enquadramento objetivo para o estudo da fiabilidade dos seus serviços, as condições que levam a uma regularidade deficiente e a melhoria do planeamento do serviço e monitorização, através dos conjuntos de dados AVL disponíveis. Os níveis de complexidade que envolvem a fiabilidade do serviço e o comportamento estocástico da operação dos sistemas de TP rodoviários não permitem desenhar uma solução única e simples para o BB. Portanto, foi desenvolvida uma ferramenta na qual a implementação de várias estratégias pode ser testada.

2 FIABILIDADE DO SERVIÇO

A fiabilidade do serviço pode ser definida em termos da variabilidade dos atributos do serviço, dos efeitos no comportamento do passageiro e do desempenho do operador [2] e pode ser considerada em termos de pontualidade ou regularidade.

No contexto de serviços de alta frequência e alta procura (com *headways* menores do que 10 minutos [9]), a regularidade é o principal determinante do tempo de espera do passageiro e a fiabilidade precisa de ser interpretada em termos de regularidade e não de pontualidade. Portanto, medidas para melhorar a fiabilidade devem focar-se em manter *headways* constantes entre autocarros, em vez de se focarem em seguir os horários [6].

2.1. Indicadores de regularidade

Vários autores propuseram uma ampla gama de medidas para avaliar a regularidade do serviço, que podem ser divididas em duas categorias: indicadores que se baseiam na distribuição de *headways* e indicadores que se focam na distribuição do tempo de espera do passageiro.

A primeira categoria inclui o coeficiente de variação das *headways*, $COV(h)$ [6] e o desvio padrão das *headways* calculadas [10, 11]. Outras medidas referem-se à proporção de *headways* num certo intervalo de tempo [9].

A $COV(h)$ representa o rácio entre o desvio padrão das *headways* observadas e a média das *headways* (equação 1):

$$COV(h) = \frac{\sigma_{h_{k,s}}}{\left[\frac{\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} (h_{k,s})}{(|K| \times |S|)} \right]} \quad (1)$$

onde $\sigma_{h_{k,s}}$ denota o desvio padrão das *headways* observadas. Esta é uma medida normalizada da variabilidade de *headways*, que é zero no cenário ideal em que todas as *headways* são iguais. Quanto mais irregular é o serviço, mais alto é o valor de $COV(h)$. Este valor é uma medida estatística que fornece um indicador direto da variabilidade do serviço. Contudo, não é intuitiva e pode não capturar a experiência dos utilizadores.

[9] estabelece também níveis de serviço (LOS) em termos da aderência das *headways*, baseados nos valores de $COV(h)$, tal como apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Níveis de serviço (LOS) em termos de regularidade. Adaptado de [9]

Nível de serviço (LOS)	Coeficiente de variação de <i>headways</i> (COV(h))
A	0.00 - 0.21
B	0.21 - 0.30
C	0.31 - 0.39
D	0.40 - 0.52
E	0.53 - 0.74
F	≥ 0.75

A segunda categoria contempla medidas como o tempo médio de espera do passageiro, $E(\text{waiting time})$, e o excesso de tempo de espera [6], esta última que exige informações de taxas de embarque.

O $E(\text{waiting time})$ representa a soma de metade da média de *headways* com metade do rácio entre a variância de *headways* e a média de *headways*, como foi apresentado por [12], i.e.:

$$E(\text{waiting time}) = 0.5 E(\text{headway}) + 0.5 \frac{V(\text{headway})}{E(\text{headway})} \quad (2)$$

2.2. Bus bunching

Como explicado por [13], a variável mais importante para eventos de BB é a distância (em tempo) entre dois autocarros consecutivos que se deslocam na mesma linha, i.e., a *headway* entre estes veículos. Suponhamos que a viagem k de uma dada linha de autocarros é definida como $T_k = \{T_{k,1}, T_{k,2}, \dots, T_{k,s}\}$, onde $T_{k,j}$ denota o tempo de chegada à paragem j do autocarro a efetuar a viagem k e s denota o número de paragens de autocarro definidas na referida viagem. Consequentemente, a *headway* entre dois autocarros que se desloquem em viagens consecutivas k e $k + 1$ pode definir-se como se segue (equação 3):

$$H = \{h_1, h_2, \dots, h_s\}: h_i = T_{k+1,i} - T_{k,i} \quad (3)$$

Um ponto comum a toda a bibliografia é o reconhecimento de que o BB não ocorre quando um grupo de autocarros se forma, mas antes, quando o *headway* se torna instável, abaixo de um certo limite. Segundo [9], o limiar que define a instabilidade é um quarto do *headway* planeado.

Para implementar eficientemente estratégias que evitem o BB ou reduzam o seu impacto, as causas fundamentais do BB e da falta de fiabilidade devem ser compreendidas. Fatores comuns (externos) para todas as operações de TP rodoviários incluem condições gerais de trânsito; a presença de interseções sinalizadas ao longo da linha (configuração da rota); variações de procura; disponibilidade do veículo e do motorista e clima. Causas inerentes (internas) de um serviço não fiável são, por exemplo: partidas irregulares do terminal; tempos de execução e recuperação agendados irrealistas; comportamento do condutor ou mau desempenho [14].

Estratégias para lidar com o BB têm sido investigadas, quer sejam preventivas (visando reduzir a probabilidade de BB) ou corretivas (que permitem evitar uma maior propagação da irregularidade uma restauração mais rápida das operações normais) [14]. Porém, medidas preventivas e corretivas podem não ser suficientes. Por isso, é de extrema importância tomar medidas proactivas no contexto de sistemas inteligentes de transporte (ITS), onde o controlo de operações em tempo real (RTO) e a disseminação de informação em tempo real (RTI) para o passageiro são essenciais [15].

3 DETECÇÃO DE BUS BUNCHING

Nesta secção, é explicada a metodologia seguida para a detecção de BB no serviço de transportes da Carris. Primeiramente, foi feita uma análise dos indicadores de fiabilidade utilizados pela Carris (nomeadamente, as falhas no serviço, comparando o *offered km×vehicles* com os *lost km×vehicles*). Em seguida, escolheu-se uma linha de autocarros para a qual se recolheram dados. Por fim, utilizou-se o software *Mathematica* para processar a informação, criando um modelo de detecção de BB. No link que se segue, podem ser consultadas as paragens e o horário do percurso da linha em estudo (<http://www.carris.pt/pt/autocarro/758/ascendente/>).

A atual estratégia de controlo em Lisboa foi concebida para melhorar a pontualidade do serviço - os condutores de autocarros de cada veículo têm um determinado tempo para deixar os dois terminais e devem seguir as chegadas agendadas para as paragens intermédias. A empresa fornece aos clientes um horário que apresenta as partidas planeadas dos terminais e o tempo esperado entre paragens. Contudo, não é esperado que os motoristas adequem a condução para cumprir os horários de chegada, a menos que recebam alguma instrução do centro de controlo.

Os controladores seguem as posições dos veículos em cada linha através de diagramas simplificados, atualizados a cada 30 segundos. Uma das deficiências da prática atual é que, embora as unidades AVL permitam a monitorização em tempo real dos autocarros, há pouco uso metódico dos dados para melhorar a fiabilidade. Os dois principais usos dos dados são informar os usuários sobre as chegadas estimadas dos veículos e a avaliação do desempenho dos horários. As medidas de controlo tendem a ser implementadas apenas quando o BB já ocorreu.

3.1. Recolha de informação

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir do sistema AVL, que assegura a comunicação entre o veículo e a infraestrutura, bem como o armazenamento de dados no centro de controlo (pelo menos a cada 30 segundos).

Os dados do AVL são armazenados numa pasta com tantos arquivos quanto o número de veículos a operar nesse dia. Cada veículo tem dois identificadores: 1) o número do rádio - relacionado com os componentes que reúnem a localização do veículo; 2) o número de identificação (ID) - o número que a Carris utiliza para identificação da frota. Os identificadores são únicos e há uma correspondência um-para-um entre ambos.

Para cada número de rádio, o ficheiro AVL tem um número de linhas igual ao número de registos de posição daquele dia para aquele veículo, com informações sobre diversas variáveis, tais como: 1) o registo de data e hora; 2) a viagem do autocarro; 3) a localização (longitude e latitude); 4) a direção; 5) a variante de direção; 6) o número da placa. Para além dos dados AVL, as seguintes fontes de informação foram utilizadas neste estudo:

- Os números de identificação dos veículos que foram utilizados no percurso do autocarro 758, em cada dia;

- As informações sobre as paragens para o percurso do autocarro 758;
- As viagens programadas para cada número de placa e direção para o percurso do autocarro 758.

3.2. Tratamento da informação

Começou por se processar a informação das unidades AVL para dois dias (1 e 6 de fevereiro de 2018), tendo em mente a futura replicação da metodologia para um conjunto de dados maior (o mês de maio de 2018). Cada pasta AVL de um dia específico representa cerca de 1 Gb de armazenamento. O processamento de dados foi feito usando o software *Wolfram Mathematica*, devido ao seu poder técnico e facilidade de uso, tendo sido realizadas as seguintes ações:

- 1) Importação das informações sobre os números de identificação dos veículos que foram usados em cada dia.
- 2) Conversão dos números de ID em números de rádio (através de uma tabela de conversão).
- 3) Acesso às informações AVL de cada veículo - criando uma rotina que importa o arquivo de dados AVL de cada rádio entre todos os arquivos das pastas diárias (existem cerca de 1200 arquivos AVL para cada dia, que representam o número de veículos em operação da frota da Carris).
- 4) Limpeza de dados: cada arquivo AVL contém todos os registos de localização de um veículo durante todo o dia de operação. Foram eliminados registos errados ou ininteligíveis e foram mantidas apenas as variáveis que seriam necessárias para o modelo de detecção de BB.
- 5) Cálculo de distância entre coordenadas: a distância entre os registos de posição (latitude e longitude) foi calculada usando o método simplificado de *Haversine*¹, devido à ausência de informações sobre a altitude.
- 6) Visualização da trajetória diária de um veículo: foram elaborados gráficos da distância à garagem (Linda-a-Velha) ao longo do tempo. Pelos gráficos, foi visível que não há separação dos dados quando o veículo inicia ou termina uma viagem e que o mesmo veículo pode ser alocado para diferentes linhas de autocarro, existindo necessidade de filtrar os dados para considerar somente as viagens respeitantes à linha 758.
- 7) Desagregação de dados: foram realizadas as seguintes ações para separar as diferentes viagens (dentro das viagens diárias de cada veículo): identificar o início e o fim de cada viagem, pela variação na direção, número da viagem e tipo de registo salvo nos arquivos AVL; separar os dados AVL entre os registos de final de viagem; agrupar as viagens de cada direção para cada veículo; eliminar as viagens de percursos de autocarro que não o 758 (pela identificação do número da placa).
- 8) Agregação de dados: foi criada uma rotina que carrega os arquivos AVL e permite a sua visualização das viagens de cada autocarro para uma direção e intervalo de tempo específicos.
- 9) Detecção de tempos de passagem em cada paragem: o próximo objetivo era detetar os horários em que cada veículo passava em cada paragem, combinando os dados sobre a localização das paragens com um critério de proximidade (já que os registos de localização dos veículos são feitos a cada 30 segundos). Portanto, foi desenhada uma rotina que analisa cada registo de cada viagem e procura a linha que tem o local mais próximo de cada paragem. A rotina de pesquisa examina apenas os registos que estão a menos de 200 metros da paragem.
- 10) Detecção de bus bunching: para identificar as ocorrências de BB do percurso 758, o último ponto consiste em comparar os tempos em cada paragem para veículos consecutivos (ou seja, olhar para os *headways* entre os veículos em cada paragem) e decidir se estes são menores que o limite estabelecido. Foram comparadas as viagens de um rádio com outras viagens no mesmo rádio, bem como com todas as viagens dos outros rádios, sem repetir comparações, e foram identificados os *headways* menores que o valor limite. Um dos limites comumente utilizados é um quarto do *headway* planeado (ver ponto 2.2). O *headway* planeado para o percurso 758 para o período de ponta da manhã (MP) e período

¹ Este método é usado para calcular a distância mais curta sobre a superfície da Terra entre dois pontos, ignorando variações de altitude entre os

de ponta da tarde (EP) varia entre 6 a 10 min. Portanto, foram testados três limites (1, 2 e 3 minutos) para identificar as ocorrências de BB. Obviamente, quanto menor o limite, menor é o número de ocorrências esperadas.

A rotina devolve o número de viagens em que foi detetado BB, para cada limite considerado, bem como os números de rádio dos pares de autocarros que originaram bunching.

11) Cálculo do *headway*: Além da detecção do BB, classificaram-se as diferentes viagens, em cada direção, pela hora de partida, de forma a calcular os *headways* para viagens consecutivas. A rotina de ordenação analisa os tempos de passagem, de cada viagem, em cada paragem e classifica as viagens com base nos tempos de passagem na primeira paragem (horário de partida do terminal). Se houver falta de um registo para o tempo de passagem na primeira paragem (devido a falhas nos registos de GPS), a função examina o primeiro tempo de passagem válido e recorre a pesquisa binária para ordenar essa viagem com o já existente de viagens ordenadas, com base no tempo de passagem naquela paragem específica. Este passo é fulcral para o cálculo das estatísticas dos *headways* para viagens consecutivas.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Após o desenvolvimento do modelo em *Mathematica*, foi traçada a estratégia para o estudo das ocorrências de BB na linha 758, no mês de Maio de 2018. Em primeiro lugar, analisaram-se os resultados do modelo de detecção e seguidamente procedeu-se a uma análise mais vasta da regularidade do serviço.

4.1 Detecção de bus bunching

4.1.1 Visualização diária das trajetórias dos autocarros

Uma das ferramentas mais poderosas na visualização das trajetórias dos autocarros são os diagramas de marcha (espaço-tempo). Eles permitem a identificação de problemas relacionados com a operação ou calendarização e também avaliar a eficácia de implementação de estratégias de gestão [16]. A estrutura do modelo permite que o operador defina a direção, o período temporal e o dia e obtenha os resultados automaticamente.

Como exemplo, apresenta-se na figura 1 o um diagrama de marcha. O eixo das abcissas representa o tempo (horas) enquanto as ordenadas mostram a distância à garagem (metros). As trajetórias dos autocarros são mostradas a diferentes cores. De acordo com o modelo, neste período mostrado na figura 1, deram-se 9 ocorrências de BB (para o limite de 2 minutos), o que representa 30% das viagens deste período. A análise da figura 1 permite a visualização desses mesmos eventos.

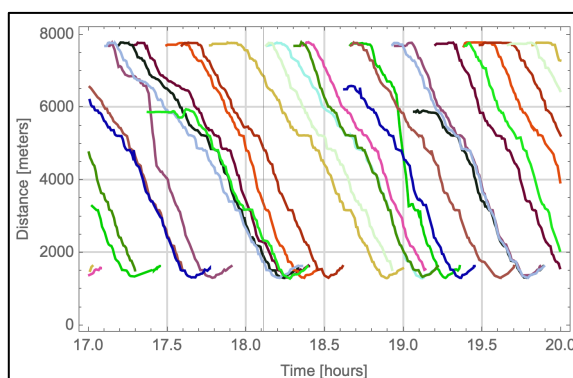


Figura 1 - Exemplo de diagrama de marcha: 22 de Maio de 2018, período de ponta da tarde (17h-20h), direção 1

4.1.2 Resultados globais de detecção de bus bunching

Após correr o modelo de detecção para todos os dias regulares de Maio de 2018, procedeu-se ao agrupamento dos resultados por dia de semana. Foi analisado um total de 4180 viagens (2053 na direção 1 e 2127 na direção 2) e o foco

da análise esteve nos períodos de ponta da manhã (MP) e da tarde (EP). A figura 2 mostra as percentagens de viagens em que BB foi detectado, referentes ao total de viagens em cada dia. É possível ver que: 1) as frequências de detecção de BB em cada período de análise variam entre cerca de 20% e 40% (o que confirma a importância do fenómeno); 2) não há uma relação clara entre as detecções de BB de uma direção para a outra (embora no EP as ocorrências na direção 1 sejam superiores às da direção 2); 3) não há um dia específico em que o fenómeno tenha particular importância.

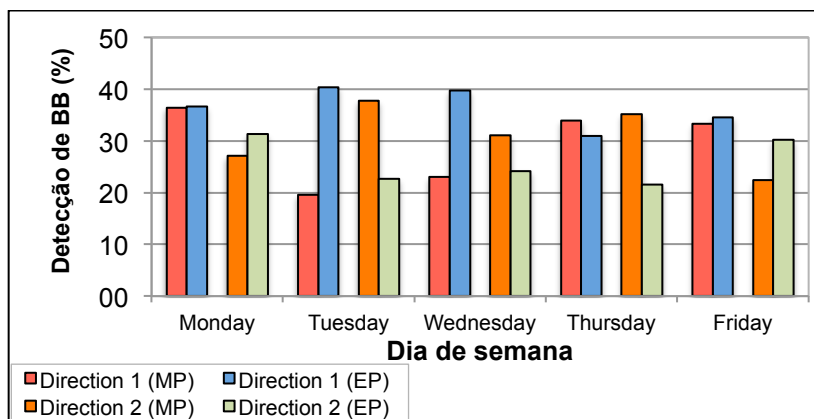


Figura 2 - Percentagem de detecção de BB por dia de semana e período de ponta (manhã, MP e tarde, EP)

4.1.3 Bus bunching ao longo do percurso

Nesta secção avalia-se a forma como os eventos de BB evoluíram ao longo do percurso nas duas direções. A título de exemplo, apresenta-se na figura 3 a evolução observada na direção 1. As mesmas figuras foram obtidas para a direção 2 e para os períodos de ponta, com resultados similares. O eixo das abcissas representa o número ordenado das paragens, enquanto o eixo das ordenadas representa a frequência em que se detetou BB nessas paragens. Três linhas representam três possíveis limites para a definição de BB e, como esperado, quanto menor o limite, menos detecções de BB serão observadas.

Na figura 3, observa-se um crescimento das frequências de BB ao longo do percurso, o que confirma que o BB se prolonga ao longo do percurso, após a sua formação e que é pouco provável que os dois autocarros se afastem depois de terem ficado agrupados, se não forem tomadas medidas corretivas. Para além disso, resulta da figura 3 que, quanto mais próximo o autocarro estiver do final do percurso, mais provável é que já tenha experienciado irregularidades no seu serviço, uma vez que já percorreu uma maior distância.

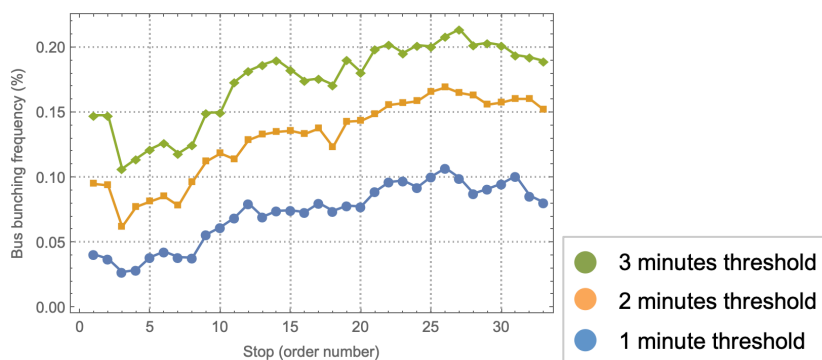


Figura 3 - Frequência de bus bunching - evolução ao longo do percurso na direção 1

4.1.4 Onde se iniciam as ocorrências de bus bunching?

Uma vez identificadas as ocorrências de BB, é importante analisar a seleção de viagens em que o fenómeno ocorreu e analisar, dentro de cada uma dessas viagens, onde é que o fenómeno teve início. Procedeu-se à identificação das

paragens em que tal aconteceu nos períodos de ponta (MP e EP) para os limites de definição de BB de 1 e 2 minutos para cada direção e apresentam-se nesta secção os resultados mais relevantes.

Na direção 1, mais de 15% das formações de BB ocorreram em Sete Rios. Para além disso, a maioria das formações ocorreu entre Cais do Sodré e Sete Rios, o que está de acordo com as expectativas: Sete Rios é um ponto problemático esperado, dada a sua importância nas transferências para outros modos (com agravantes nos tempos de embarque e desembarque do autocarro). Para além disso, a paragem também funciona como ponto de passagem de turno para os condutores, o que pode atrasar as partidas.

Para além disso, o facto de a maioria das viagens de BB terem origem entre o Cais do Sodré e Sete Rios não é surpreendente, já que esta é a parte da linha onde a configuração do percurso é mais desafiante: a estrutura estreita da cidade nas zonas mais históricas (entre Cais do Sodré e Rato), o facto de o autocarro operar quase sempre em condições de tráfego partilhado e a presença de interseções sinalizadas, entre outros factores, causam uma variação nos tempos de percurso que pode dar origem a mais eventos de BB.

Embora esta tendência já seja notável na direção 1, ao analisar as viagens da direção 2 esta tendência é ainda mais óbvia. Para a direção 2, quase nenhuma ocorrência de BB tem origem nas 12 primeiras paragens do percurso (entre Portas de Benfica e Estrada de Benfica - Furnas) enquanto que, após Sete Rios, a quantidade de formações de BB é mais considerável. Adicionalmente, mais de 20% das formações de BB dão-se em Sete Rios.

4.1.5 A influência dos *headways* na partida do terminal

Na secção 4.2.3, viu-se que algumas das formações de BB se deram nas primeiras paragens do percurso, o que pode indicar que algumas das viagens começam com *headways* irregulares desde o terminal. Para avaliar essa possibilidade, estabeleceu-se uma relação entre a *headway* entre viagens consecutivas no terminal e a existência de bus bunching em qualquer paragem ao longo do percurso.

A figura 4 mostra as probabilidades BB em qualquer ponto da linha (considerando o limiar de 2 minutos) para diferentes *headways* à partida (uma curva semelhante foi obtida para a direção 2).

É possível ver que, se o *headway* na partida estiver entre 0-2 minutos, a probabilidade do BB a jusante é de 100%, o que é esperado, enquanto que se o *headway* na partida for entre 8-9 minutos, a probabilidade de BB na linha é de cerca de 30%. A tendência geral para ambas as direções é a de a probabilidade de BB na linha diminuir à medida que os *headways* na partida aumentam até um valor mais próximo do *headway* programado (10 minutos para os períodos de ponta e cerca de 15 minutos para os restantes). Isso indica que quanto mais próximos os autocarros partem uns dos outros do terminal, mais provável é que o BB aconteça na linha, o que é consistente com os resultados de [16].

Esta tendência reforça a importância de acompanhar as saídas dos autocarros dos terminais de Cais do Sodré e Portas de Benfica.

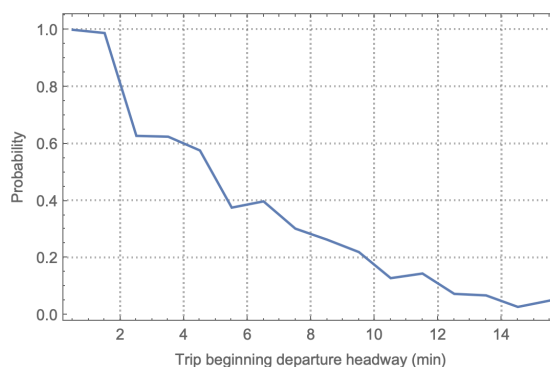


Figura 4 - Probabilidade de BB a jusante consoante a *headway* entre autocarros no terminal de Cais do Sodré (direção 1)

4.2 Avaliação da regularidade do serviço

4.2.1 A distribuição de *headways*

A regularidade do serviço foi analisada primeiramente através da construção da distribuição das *headways* para todo o universo de paragens. Quanto mais estreita for a distribuição em torno da *headway* planeada, mais regular é o serviço [17]. Começou por se calcular a distribuição de *headways* para os dias completos (6h00-20h00) e, em seguida, focou-se nos períodos de ponta. Como exemplo, apresentam-se os resultados para a direção 2, no EP (17h00-20h00), que teve o pior desempenho. O eixo das abcissas representa gamas de *headways* de 2 minutos enquanto o eixo das ordenadas representa as frequências nas quais os *headways* entre autocarros consecutivos estiveram nessas gamas.

A forma dispersa da distribuição de *headways* revela o fraco desempenho em termos de regularidade. A gama mais frequente é aquela que representa as situações do BB (0-2 minutos), o que é alarmante. Há uma grande variedade de valores de *headways*, sem foco claro no valor planeado (à volta de 10 minutos). Também é possível observar que ocorreram ultrapassagens, já que há registos de *headways* negativos.

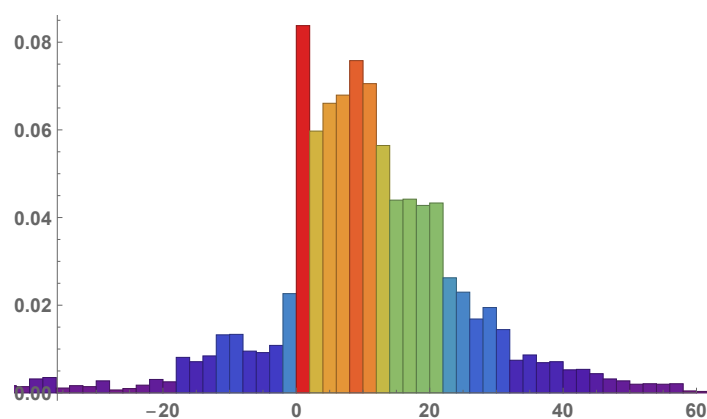


Figura 5 - Distribuição de *headways* para a direção 2 (17h00-20h00)

4.2.2 Coeficiente de variação das *headways* - variação no tempo

Com o intuito de obter uma melhor compreensão sobre como a regularidade evoluiu ao longo do período do estudo, calculou-se o coeficiente de variação de *headways*, $COV(h)$, para cada dia. Quanto menores os valores de $COV(h)$, mais regular é o serviço e menos provável é a ocorrência do BB (tabela 1).

Analizou-se a variação do $COV(h)$ para ambas as direções. No que diz respeito à medida em que a regularidade varia de um dia para o outro, não foram observados padrões claros. Em ambos os sentidos, verificou-se que o LOS em termos de regularidade variou de E a F no período MP (os dois piores níveis, onde o BB é frequentemente esperado), enquanto que no período EP, o LOS foi sempre F, a pior categoria. Deve notar-se que apenas os valores positivos de *headways* foram considerados para o cálculo do $COV(h)$ para cada dia. Caso contrário, poderia ter havido uma tendência de cancelamento de valores negativos com os valores positivos, alterando a média de *headways*. Também se compararam as flutuações de regularidade na direção 2 com as da direção 1 e nenhum padrão foi observado. Os problemas de irregularidade foram comuns a ambas as direções e períodos do dia.

4.2.3 Coeficiente de variação das *headways* - variação paragem a paragem

A propagação da irregularidade ao longo do percurso também foi investigada, calculando os valores de $COV(h)$ para cada paragem. Na figura 6 podem ver-se os resultados para a direção 1 (a figura para a direção 2 não está incluída devido a restrições de espaço). Em ambas as direções, a variabilidade dos *headways* aumenta consideravelmente ao longo da linha e os autocarros chegam muito irregularmente às últimas paragens. No entanto, as partidas do terminal são muito irregulares (o LOS em termos de aderência de *headways* apenas pontua E, o segundo nível mais baixo, e

tende a agravar-se para o nível F ao longo do percurso). Notou-se ainda que, em geral, o serviço é mais irregular no EP do que no MP, apoiando os resultados anteriores.

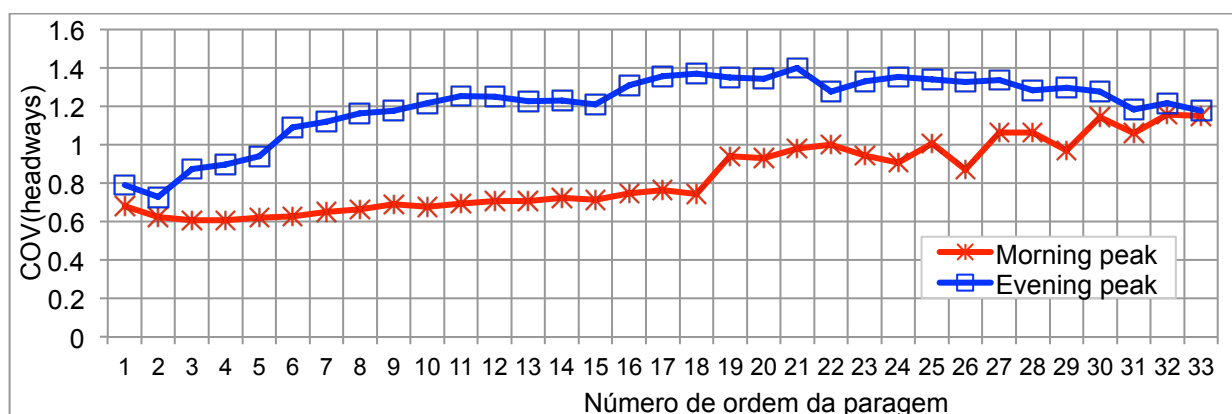


Figura 6 - Coeficiente de variação de headways (variação por paragem na direção 1)

4.2.4 Valor esperado do tempo de espera

Uma segunda categoria de medidas de regularidade concentra-se nos indicadores que avaliam a distribuição do tempo de espera do passageiro. Na verdade, os tempos de espera dos passageiros são determinados pela regularidade do serviço (por exemplo, as lacunas no serviço têm impactos significativamente negativos no tempo de espera do passageiro).

Foram avaliados os efeitos do BB na distribuição do tempo de espera em ambas as direções através do cálculo do tempo médio de espera do passageiro, $E(\text{waiting time})$. Apresentam-se os resultados que foram obtidos ao longo da linha na direção 1, na figura 7. Num cenário ideal, todos os autocarros estariam espaçados uniformemente e, considerando um *headway* programado de 10 minutos, o tempo teórico médio de espera do passageiro seria de 5 minutos.

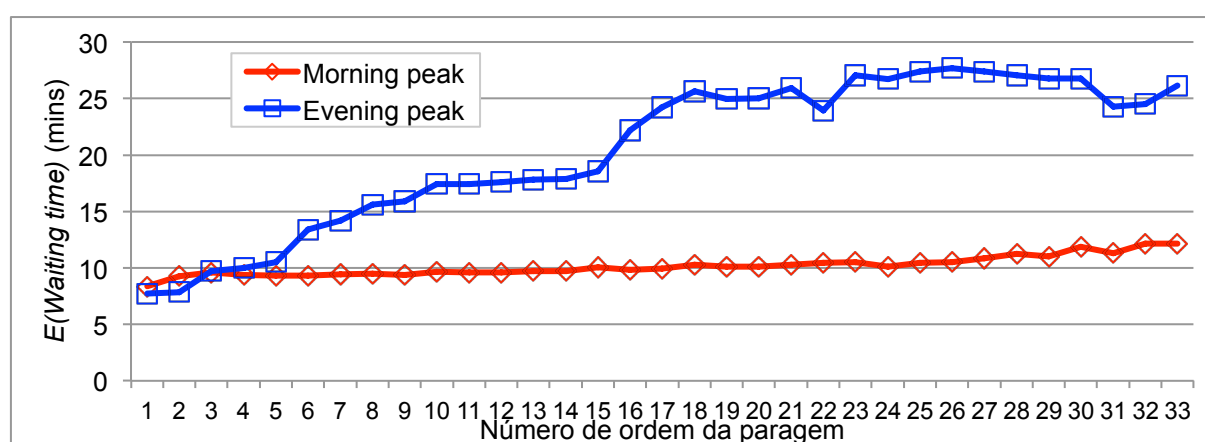


Figure 7 - Valor esperado do tempo de espera ao longo da direção 1

Para a direção 1 (figura 7), há uma diferença de 3 minutos entre o valor teórico e o valor real na primeira paragem (ou seja, cerca de 8 minutos para ambos os períodos de ponta). Para ambos os sentidos, foi visto que a propagação da irregularidade é sentida mais severamente pelos passageiros no EP do que no MP, se bem que o $E(\text{waiting time})$ deteriora-se em ambos os períodos ao longo do percurso. Considerando o período em que o $E(\text{waiting time})$ aumentou menos ao longo da linha (que foi o MP para a direção 1), o $E(\text{waiting time})$ nas paragens no meio do percurso é de aproximadamente 10 minutos, o que representa um desvio de 5 minutos do previsto. Pode parecer não muito, mas se se assumir que a penalidade média do tempo de espera do passageiro é de 10 €/hora, e que a procura de

passageiros é de 500 pessoas/hora ao longo da linha neste período de ponta, o custo associado ao tempo de espera dos passageiros neste período de pico de 3 horas será 1250 €.

E isso é apenas para um dia, para esta linha e direção no pico da manhã, sem considerar os horários de ponta da tarde, a outra direção, as outras linhas, e que o número potencial de passageiros pode diminuir devido a irregularidades. Por fim, observei o tempo total de viagem das viagens investigadas e concluí que a velocidade comercial na linha 758 está abaixo da indicada pela Carris (14 km/h) - a velocidade comercial calculada para os dias completos variou entre 11,4 e 12,4 km/h.

5 CONCLUSÕES

As principais contribuições deste artigo para a Carris (e possivelmente outros operadores) são as seguintes:

- A conversão de informação operacional (dados AVL) em *outputs* visíveis (como os diagramas espaço-tempo);
- O cálculo e a visualização das medidas de regularidade em serviços de alta frequência;
- O desenvolvimento de um modelo de detecção de BB com base em dados AVL, com liberdade para o utilizador na escolha da direção, do período temporal de análise e do limite para a definição de BB.

O modelo desenvolvido pode ser aplicado a outras linhas de autocarro, com o carregamento da informação dos identificadores dos autocarros afetados a essas linhas e também com a localização das paragens das mesmas.

Os resultados obtidos levam a que se façam as seguintes recomendações à Carris, para que possa tirar partido do trabalho desenvolvido:

- Testar a implementação de estratégias preventivas (como a implementação de faixas BUS dedicadas ou de mecanismos de prioridade em interseções semaforizadas) e avaliar as diferenças de resultados em termos de fiabilidade e da detecção de BB;
- Monitorizar cuidadosamente os desvios nas *headways* nos terminais de partida (Portas de Benfica e Cais do Sodré).
- Usar o modelo desenvolvido para avaliar o sucesso das mudanças na configuração da infraestrutura efetuadas no final de 2018 entre as paragens Portas de Benfica e Estrada de Benfica (Furnas);

Uma recomendação mais ambiciosa passaria pelo ensaio de um novo esquema de operação, orientado para a regularidade e não para a pontualidade e pela avaliação dessa alteração na fiabilidade do sistema. Tal mudança envolveria um novo tipo de controlo em tempo real, que poderia ser implementado através da comunicação entre autocarros [18].

Por último, indico as principais direções em que o trabalho desenvolvido neste artigo pode ser continuado:

- Ampliação da base de dados (ao incluir dados referentes a um maior período temporal e representativos da rede completa e das interações entre diferentes linhas de autocarros que usem a mesma infraestrutura);
- Extensão dos indicadores de fiabilidade (regularidade) do sistema com a inclusão de informação das contagens de passageiros;
- Avaliação das restantes causas de BB, para além dos desvios das *headways* nos terminais de partida;
- Desenvolvimento de um modelo de previsão de BB em tempo real que avalie padrões nos desvios de *headways*, que possa ser usado para tomar medidas proactivas.

6 AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Carris - Transportes Públicos de Lisboa, pela disponibilização dos dados de localização de autocarros da sua rede no mês de Maio de 2018, que permitiram o desenvolvimento deste artigo.

7 REFERÊNCIAS

1. Haiyang Yu, Dongwei Chen, Zhihai Wu, Xiaolei Ma, Yunpeng Wang, 2016, Headway-based bus bunching prediction using transit smart card data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 72, November 2016, Pages 45-59
2. Abkowitz, M., H. Slavin, R. Waksman, L. Englisher, N. Wilson. 1978. Transit Service Reliability: Final Report. Technical Report MA-06-0049-78-1, Urban Mass Transportation Administration.
3. Hickman, Mark D., 2001, An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. *Transportation Science* 35 (3):215-237.
4. Oort, N. van, Nes, R. van, 2007, Improving Reliability in Urban Public Transport in Strategic and Tactical Design, Prepared for the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board 2008 Waard J. van der. 1988
5. Fonzone, A., Schmöcker, J.D., Liu, R., 2015. A model of bus bunching under reliability-based passenger arrival patterns. *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 7, 164–182.
6. Cats, O., 2014. Regularity-driven bus operation: Principles, implementation and business models, *Transport Policy* 36, pages 223–230
7. Feng, W., Figliozzi, M., 2011. Empirical findings of bus bunching distributions and attributes using archived AVL/APC bus data. *Int. Conf. Chin. Transport. Prof.*, 4330–4341
8. Gershenson C, Pineda L.A., 2009, Why Does Public Transport Not Arrive on Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability. *PLoS ONE* 4(10).
9. TCQSM 2nd Ed. (2003). Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM), Second Edition, Transportation Research Board, TCRP Report 100, Washington, DC.
10. Bartholdi III, J.J., Eisenstein, D.D., 2012. A self-coordinating bus route to resist bus bunching. *Transportation Research Part B* 46 , p. 481–491
11. Cats, O., Burghout, W., Toledo, T., Koutsopoulos, H., 2010. Mesoscopic Modeling of Bus Public Transportation, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2188, pp. 9–18.
12. Osuna, E.E., Newell, G.F., 1972. Operational strategies for an idealized public transportation system. *Trans. Sci.* 6 (1), 52–72.
13. Moreira-Matias, L., Cats, O., Gama, J., Mendes-Moreira, J., Sousa, J.F., 2016, An online learning approach to eliminate Bus Bunching in real-time, *Applied Soft Computing* 47, Pages 460–482
14. Cham, L., 2006, Understanding Bus Service Reliability: A Practical Framework Using AVL/APC Data, Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Transportation at the Massachusetts Institute of Technology
15. Cats, O. & Loutos, G. (2015). Real-Time Bus Arrival Information System – An Empirical Evaluation. *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology Planning and Operations*. 10.1080/15472450.2015.1011638.
16. Figliozzi, M., Feng, Wu-Chin, Gerardo Lafferriere, and Feng, Wei. 2012 A Study of Headway Maintenance for Bus Routes: Causes and Effects of “Bus Bunching” in Extensive and Congested Service Areas. OTREC-RR-12-09. Portland, OR: Transportation Research and Education Center (TREC)
17. Cats, O., 2013 RETT3—Final Report, A Field Experiment for Improving Bus Service Regularity. Available at: <http://www.ctr.kth.se/research.php?research=rett3>

18. Daganzo, C.F., Pilachowski, J., 2011. Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. *Transportation Research Part B* 45 (1), 267–277.