

MODELO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS RESPONSIVO À DEMANDA

Priscila Coutinho Costa
Claudio Barbieri da Cunha
Renato Oliveira Arbex

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes
Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

RESUMO

O avanço da tecnologia móvel tem levado ao surgimento de inúmeras empresas emergentes (as chamadas *start-ups*) no setor de mobilidade urbana de passageiros. Diversas delas tem a proposta de oferecer um serviço de transporte coletivo responsivo à demanda (do inglês *Demand Responsive Transit* - DRT), também chamado de *microtransit*. Algumas delas, como a *Chariot* que operava em São Francisco e o *Split* em Washington (EUA), além do pioneiro *Kutsuplus* em Helsinque (Finlândia) não sobreviveram mais do que apenas alguns anos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de um sofisticado modelo desenvolvido para otimização e simulação de sistemas do tipo DRT, em diferentes cenários de configuração de serviços e de demanda, a fim de avaliar o potencial desses sistemas responsivos à demanda no contexto do transporte urbano de passageiros. Os resultados indicam a viabilidade de tais serviços justificada por um determinado grau de utilização e ocupação dos veículos, o nível de serviço efetivo e o custo para os usuários.

ABSTRACT

The advancement of mobile technology has led to the emergence of numerous emerging companies (so-called start-ups) in the urban passenger mobility sector. Several of them aim to offer a Demand Responsive Transit (DRT) services, also called microtransit. Some of them, such as the Chariot that operated in San Francisco and Split in Washington (USA), as well as the pioneering one named Kutsuplus in Helsinki (Finland) were not able to survive for more than a few years. In this context, in this work we apply a sophisticated developed model of optimization and simulation of systems of DRT type. It was applied to different service and demand configuration scenarios in order to assess the potential of these demand-responsive transit systems in the context of urban passenger transport. The scenarios differ in terms of service network and vehicle capacity, in order to obtain information that guides the implementation of a DRT service. The results indicate the service feasibility through the use and occupancy of vehicles, service level and costs to users.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o ranking de congestionamento desenvolvido por TomTom International BV (2017), o Brasil está presente em seis colocações entre as cem cidades mais congestionadas do mundo: Rio de Janeiro (8º), Salvador (28º), Recife (43º), Fortaleza (47º), São Paulo (71º) e Belo Horizonte (99º). Para contornar os efeitos negativos e não permitir que se perpetuem no futuro, são necessárias alternativas de transportes viáveis que atraiam os usuários de transporte individuais motorizados e alimentem os sistemas de transportes estruturais já consolidados.

Com os recentes avanços da tecnologia, bem como a popularização dos chamados smartphones e o barateamento dos planos móveis de internet, inúmeros aplicativos de transporte e mobilidade vêm surgindo, inclusive diversos destinados ao transporte sob demanda (do inglês *Demand Responsive Transit*, ou simplesmente DRT), também chamados de serviço de *microtransit*, que permitem o compartilhamento de veículo por passageiros com diferentes origens e destinos, tais como o Via (VIA, 2017), o Uber Pool (Uber, 2018) e, mais recentemente, no caso do Brasil, o City Bus que está em testes em Goiânia desde fevereiro de 2019. De uma maneira simples, tais sistemas de transporte funcionam da seguinte maneira: através de um aplicativo, o usuário informa o seu local de origem e o seu destino, à semelhança de aplicativos como o Uber, Lyft e 99/Didi; o sistema, então, define um ponto de parada virtual

de van (ou micro-ônibus) onde o usuário deve esperar o veículo. O valor a ser cobrado da viagem também é mostrado assim que é feita a solicitação via aplicativo no celular.

À medida que esses serviços se tornam mais disponíveis e atrativos, há uma tendência de mudança no comportamento de viagem da população. Já existem questionamentos acerca dessas alternativas eventualmente estarem contribuindo para o agravamento dos congestionamentos, uma vez que podem estar gerando novas viagens (Clewlow e Mishra, 2017), ou subtraindo usuários do transporte coletivo.

Por outro lado, em contraposição, conforme demonstram Alonso-Mora *et al.* (2017) para o caso do sistema de taxi na cidade de Nova Iorque, o compartilhamento de viagens permitiria a redução da frota desse serviço em 75% sem impactar significativamente os tempos de viagem. Tendo isso em vista, o compartilhamento de viagens pode produzir efeitos benéficos às cidades, possibilitando o aumento do número médio de passageiros por veículo e a redução dos congestionamentos e emissões. Adicionalmente, tais tipos de sistema de transporte responsivo à demanda podem ser importantes nas chamadas “primeira e última milha”, uma vez que potencialmente podem permitir conectar de maneira mais eficiente (tanto em termos de rapidez, menos tempo de espera, quanto custo) áreas residenciais a sistemas estruturais de transporte tais como corredores de ônibus, sistemas BRT, metroviários ou ferroviários, substituindo redes tradicionais de ônibus alimentadores, que muitas vezes são fonte de insatisfações dos usuários, devido ao elevado tempo de viagem nessa primeira/última etapa dos seus deslocamentos.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de um sofisticado modelo desenvolvido para otimização e simulação de sistemas de transporte do tipo DRT. Esse modelo possibilita gerar novas solicitações de transporte dinamicamente, e incorpora uma heurística que permite encontrar a melhor alternativa de inserção para cada solicitação, programando-o para diferentes cenários. Sua aplicação foi utilizada para analisar diferentes cenários que viabilizem o transporte responsivo à demanda em que vários passageiros com origens e destinos distintos podem ocupar simultaneamente o mesmo veículo. Esses cenários diferem em termos do formato de atendimento e da capacidade dos veículos, a fim de obter informações que auxiliem a implementação de um serviço DRT. O foco principal do trabalho é estudar o potencial de desses sistemas responsivos à demanda no contexto do transporte urbano de passageiros, bem como avaliar de que forma se pode garantir uma maior ocupação dos veículos, garantindo determinado nível de serviço e custos adequados.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta uma revisão da literatura, citando os principais estudos relacionados com o objetivo desse trabalho e casos reais de implementação desses serviços. Na sequência, a seção 3 apresenta uma descrição sucinta do modelo de simulação e otimização, seguindo-se os elementos adotados para os experimentos na seção 4. Por fim, são apresentados, na seção 5, os resultados, seguindo-se as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Brake *et al.* (2006), sistemas do tipo DRT são serviços de transporte flexíveis em termos de rota, alocação de veículo, operador, tipo de pagamento e categoria de passageiro. Cada um desses elementos pode ter diferentes níveis de flexibilidade e podem ser determinados em momentos distintos: anteriormente ou durante operação. Também conhecido como *microtransit*, o DRT pode ser definido como um sistema intermediário entre o transporte

convencional, que oferece rotas regulares, e o serviço de taxi, em que as rotas são completamente personalizáveis (Mageean e Nelson, 2003).

O primeiro DRT completamente automatizado e dinâmico foi lançado em 2012 na cidade de Helsinque, Finlândia, denominado Kutsuplus. Esse sistema foi desenvolvido pela Autoridade de Transporte Regional de Helsinque (HSL) com o objetivo de reduzir as viagens motorizadas individuais e substituir as linhas de ônibus regulares da cidade. Com pouco tempo de operação, este serviço rapidamente conquistou novos passageiros (HSL, 2016). Todavia, em 2016, a sua operação foi interrompida devido à demanda insuficiente que justificasse os custos para o poder público.

Desde então, diferentes empresas têm buscado mercados pelo mundo para colocarem seus sistemas DRT em operação. Além disso, algumas agências de transporte e municípios tem firmado parcerias com o setor privado para oferecer serviços DRT. Em agosto de 2016, a cidade Centennial, no Colorado (EUA), iniciou parcerias com Lyft e Via Mobility Services para oferecer acesso de primeira e última milha para uma estação de VLT (veículo leve sobre trilhos) e opções de mobilidade para deficientes físicos (Westervelt *et al.*, 2018). No entanto, ainda são poucas iniciativas que conseguiram tornar suas operações viáveis devido aos altos custos ou pouca adesão dos usuários. Dessa forma, conforme apontam os autores, é necessário entender o funcionamento desses sistemas para garantir desempenho compatíveis com o que os usuários esperam de serviços dinâmicos como este.

Quadrifoglio *et al.* (2008) estudaram o impacto em produtividade de práticas operacionais específicas utilizadas por operadores de serviços DRT. Os autores investigaram o efeito de estratégias de zoneamento e de configurações de janelas de tempo na quilometragem total percorrida, tamanho de frota e ocupação dos veículos. O estudo foi realizado com dados de demanda da Los Angeles, fornecidos pelo *Access Services Incorporated* (ASI), cuja média é de 1.540 viagens por dia. As janelas de tempo referidas pelos autores significam o quanto o operador pode atrasar após o horário agendado. Como resultado das análises realizadas, o aumento dessas janelas de tempo resultou em menor número de veículos, menor quilometragem percorrida e maior compartilhamento. Os autores afirmaram que a cada minuto adicionado na janela de tempo pode reduzir aproximadamente 2 veículos, 260 milhas totais percorridas e 200 milhas percorridas sem passageiro. A fim de referência, com janela de tempo igual à zero, são necessários 614 veículos, 125.400 milhas percorridas e 44.096 milhas percorridas com veículo vazio. Quanto à política de zoneamento, foi observado que o zoneamento gera 60 veículos e 10.000 milhas percorridas adicionais, em um total de 437 veículos e 102.675 milhas percorridas no cenário sem zoneamento.

Lee *et al.* (2005) estudaram um sistema de alimentação para uma linha de metrô expressa em Taiwan, utilizando uma frota de taxi para operar como um serviço do tipo DRT. O simulador desenvolvido pelos autores faz a combinação dinâmica entre as requisições de viagens e as designa aos diversos motoristas em rota, respeitando janelas de tempo limites para espera e desvios. Além disso, o algoritmo considera uma área delimitada ao redor de uma estação, e evita que um passageiro tenha que realizar um percurso em sentido oposto à estação. Assim, foi desenvolvida uma estratégia em que se determinou o tamanho ótimo da frota sob diferentes demandas, levando em consideração o tempo de despacho, tempo de espera, tempo de viagem, número de requisições atendidas e custos operacionais

Pastor (2014) analisou a viabilidade de operar um sistema DRT como o principal modo de transporte em Tacoma, Washington. O autor gerou uma demanda aleatória a partir de dados demográficos para realizar a simulação, e concluiu que o DRT é considerável viável quando atende o mesmo volume de demanda das linhas locais fixas. No entanto, o autor conclui que a substituição das linhas fixas para DRT não seria viável pela quantidade de viagens não atendidas (9,4%), e pelo maior custo por passageiro. Por fim, os resultados apontam que os custos operacionais caem com o crescimento do sistema e que a distribuição geográfica da demanda afeta significativamente a eficiência do DRT.

Martinez *et al.* (2015) propuseram um novo design organizacional e esquemas de precificação para frotas tradicionais de taxis, a fim de utilizar tais serviços de maneira mais eficiente. Esse sistema oferece menores tarifas para aqueles passageiros que aceitarem compartilhar viagens. O estudo propõe e testa um modelo de simulação baseado em agentes. O experimento foi aplicado para a cidade de Lisboa, a qual possui em torno de 3100 taxis. Os resultados indicam que os passageiros poderiam ter uma redução de 9% no preço da tarifa, não reduzindo as receitas dos motoristas. Apesar da pouca redução, os autores afirmam que com um aumento da demanda por esses serviços, novas combinações poderão ser feitas, reduzindo ainda mais a tarifa. Os tempos médios de espera nas simulações foram de 9,36 a 10,27 minutos, sendo que a penalidade máxima em tempos de viagem foi de até 2%, sempre compensada pela tarifa.

Ronald *et al.* (2013) exploraram quatro formas de distribuição espacial da demanda na simulação de um sistema do tipo DRT: aleatória, *many-to-one*, curtas distâncias e longas distâncias. Os parâmetros estudados foram tempos médios e máximos de espera, tempos de viagem, ocupação dos veículos em termos de tempo com ele vazio ou com dois ou mais passageiros a bordo. Foi utilizada uma rede hipotética para aplicação do modelo, em formato de grade, com quadras de 250m de comprimento, velocidade média nas ruas arteriais de 60km/h e 40km/h nas demais. Os cenários testados tiveram variação: i) da demanda entre 10, 20, 30 embarque por veículo por hora (em quatro horas de simulação); e ii) do tamanho da área e número de veículos (2 x 2 km com 8 veículos, 4 x 4 km com 16 veículos, e 6 x 6 km com 18 veículos). Os principais resultados apresentados foram: i) acréscimo em tempo de espera a medida que aumenta o tamanho da área e o número de solicitações; ii) maior correlação entre a distância percorrida e o volume da demanda do que com o tamanho da área; iii) maior nível de compartilhamento em demandas com maiores distancias de viagem; iv) menor distância percorrida sem passageiros em demandas com maiores distâncias de viagem; v) forte relação entre a densidade das solicitações e o número de viagens por quilometro percorrido; e vi) grande distância percorrida sem passageiros nas viagens de sentido oposto no cenário *many-to-one*.

3. O MODELO INTEGRADO DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

Ferramentas de simulação têm sido amplamente utilizadas para avaliar o desempenho de sistemas em diversas áreas, inclusive em transportes. A simulação proporciona, para análises de sistemas DRT, a possibilidade de entender melhor o impacto de diferentes parâmetros, avaliar diferentes configurações, reduzir incertezas e riscos, e verificar viabilidade de um serviço antes de implementá-lo.

A modelagem proposta neste trabalho para um sistema do tipo DRT consiste em uma combinação entre otimização e simulação. A otimização incorpora a alocação das solicitações de viagem aos veículos, enquanto a simulação corresponde ao movimento dos passageiros e dos veículos ao longo do tempo. O modelo está organizado em quatro módulos principais: i)

gerenciador de entrada; ii) controle de simulação; iii) gerenciador das simulações; e iv) gerador de saída.

O “Gerenciador de Entrada” é o módulo que prepara o cenário para o início da simulação, registrando todas as informações referentes à demanda e à oferta, tais como posicionamento e número de veículos, horário e localização das solicitações, entre outras. Todas essas informações são recebidas e organizadas pelo módulo “Controle de simulação”, o qual verifica a cada segundo os posicionamentos dos veículos e se há eventos agendados (embarques e desembarques), ou se uma nova solicitação foi recebida. Nesse caso, o “Gerenciador das solicitações” é acionado, e a heurística de inserção verifica, em tempo real, quais são os veículos candidatos que podem atender a nova solicitação e quais são as possibilidades de inserção de embarque e desembarque na agenda de atendimento desses veículos, considerando os demais passageiros que precisam ser atendidos dentro de uma janela de tempo. A escolha do melhor veículo é baseada na inserção que resulte menor custo para o sistema em termos de tempos de espera e desvios dos caminhos mais rápidos. Ao final da simulação são geradas as estatísticas detalhadas dos resultados através do “Gerador de saída”.

Em outras palavras, o modelo proposto possibilita simular novas demandas de viagens que vão surgindo dinamicamente (parâmetros configuráveis pelo usuário, em termos da taxa de recebimento de solicitações por período de tempo e da distribuição das suas localizações) e procura pelo melhor veículo disponível para atender essa solicitação em tempo real. O algoritmo dinâmico determina o veículo baseado na escolha que resulte em menor custo generalizado para o sistema, ou seja, a nova requisição sendo analisada e para os demais passageiros cujas requisições já foram anteriormente aceitas e programadas.

Para atender isso, o algoritmo procura por todas as possibilidades de inserção de *pickup* e *dropoff* na agenda de atendimento de cada veículo, ou seja, entre os embarques e desembarques dos demais passageiros que precisam ser completados nos próximos minutos da simulação. O problema de otimização a ser resolvido dinamicamente e em tempo real, com respostas rápidas, pertence à categoria dos problemas conhecidos na literatura como problemas de roteamento do tipo “*dial-a-ride*” (Cordeau e Laporte, 2007). Serviços de transporte porta-a-porta para pessoas idosas e com necessidades especiais, com solicitações agendadas por telefone, já são uma realidade em países do primeiro mundo há pelo mais de três décadas. O problema de roteamento pertence à categoria de otimização combinatória, dada a sua dificuldade computacional, que cresce exponencialmente com o tamanho da instância a ser resolvida, o que requer algoritmos e heurísticas sofisticados (Cordeau e Laporte, 2007). Entretanto, no caso do presente modelo de simulação e otimização, as requisições de viagem não são todas conhecidas a priori, mas vão surgindo dinamicamente, uma a uma, à medida em que o relógio do simulador avança. Como se espera que nesse tipo de serviço cada um dos requisitantes necessita receber rapidamente a resposta do seu horário de embarque e do veículo que vai atendê-lo, em poucos segundos, uma heurística de inserção clássica, que determina o melhor veículo e a posição ótima de atendimento para cada requisição individualmente, é a mais adequada para encontrar a posição ótima de inserção da requisição sendo tratada.

Mais especificamente, a heurística de inserção de novos atendimentos examina todas as posições de atendimento em cada um dos veículos. A fim de garantir que nenhum usuário sofra o inconveniente de demora em embarcar, e que a sua viagem não sofra muitos desvios para embarque e desembarque de passageiros cujas solicitações venham a surgir posteriormente,

foram definidos parâmetros de tempo de espera máximo e de desvio em relação à sua viagem direta. Para cada veículo e posição de atendimento que sejam viáveis (em termos dessas duas restrições de tempo de espera e desvio máximo), é então calculado o atraso adicional imposto aos demais usuários já programado; se a inserção da nova solicitação naquela posição do veículo não violar restrição para nenhum outro usuário do veículo, a posição de inserção é considerada válida; neste caso, é então calculado o desvio total adicional (dado pela soma dos desvios adicionais individuais dos demais usuários) e escolhida a posição de inserção válida que minimiza o desvio (ou atraso) total dos demais usuários do veículo. Caso não haja nenhum veículo que atenda respeitando essas restrições, a solicitação é recusada.

4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Foram propostas simulações sob diferentes cenários para analisar e comparar resultados tendo em vista a viabilidade da operação de serviços de compartilhamento de viagem sob demanda. Esta seção apresenta os dados e as premissas adotados para realizar as simulações.

Primeiramente, o experimento foi realizado no contexto de um corredor linear de transporte. Para tanto, foi selecionado um trecho de uma grande avenida em São Paulo; mais especificamente ao longo da Avenida Vergueiro, Rua Domingos de Moraes e Avenida Jabaquara, com uma extensão de 6 km, sendo que as origens e os destinos das requisições de transporte a serem geradas randomicamente se localizam ao longo desse eixo. Aplicou-se uma taxa de demanda de 150 requisições por sentido por hora, segundo uma distribuição de Poisson, tendo em vista ser o DRT um serviço com menor expressividade e caráter local. A finalidade básica desse experimento é avaliar qual a lotação que é possível obter numa situação em que os veículos não precisam fazer desvios para atender as requisições, uma vez que as mesmas se localizam ao longo de um eixo linear de transportes. Deve-se destacar que o valor de taxa de chegadas $\lambda = 150$ requisições por sentido e por hora representa intervalos médios de 4 minutos entre veículos com ocupação média de 10 passageiros.

Outro experimento foi realizado em um contexto de primeira e última milha, também em São Paulo, em torno da estação de metrô Terminal Vila Madalena. Foi delineada uma área de 10 km² (Figura 1), considerando como uma possível região de influência, estimada a partir das rotas dos ônibus que trafegam próximo à estação e de uma amostra de viagens realizadas por um serviço de transporte sob demanda que opera no município. Nesse caso, foi aplicada uma taxa de demanda mais significativa de 1.250 solicitações por sentido por hora, considerando que em uma hora pico de um dia útil se observa nessa estação até 30 mil embarques (Metrô, 2019).

Para os dois cenários, os pontos de partida dos veículos foram distribuídos de forma que qualquer usuário consiga ser atendido dentro do tempo de espera máximo na área de atendimento. A priorização na escolha dos veículos foi dada para aqueles já ocupados, a favor da eficiência operacional em termos de ocupação. Para cada ponto são disponibilizados um número ilimitado de veículos, de forma que, se nenhum veículo em rota esteja apto para atender uma nova solicitação, será imediatamente alocado um novo. Dessa forma, todas as solicitações serão atendidas e, ao final da simulação, será obtida a quantidade de veículos necessária para atender aquela taxa de demanda específica dentro do cenário escolhido.

Todos os experimentos tiveram uma limitação com relação ao nível de serviço. Tendo por base os parâmetros aplicativos de transporte do tipo DRT oferecem em média (Chariot, 2018; Via,

2017), foi estabelecido um tempo de espera máximo de 10 minutos e um desvio máximo que corresponde a um multiplicador de 2,5 em relação ao tempo da viagem direta.

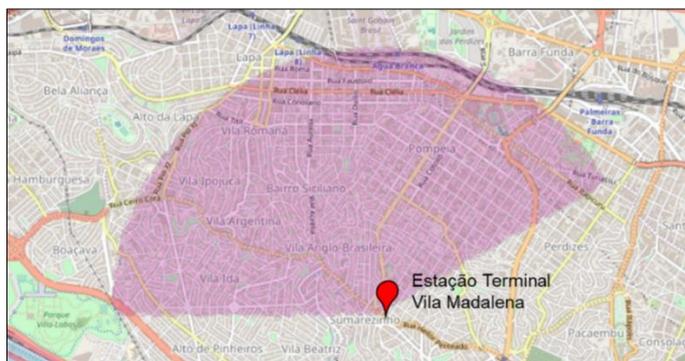


Figura 1: Área de atendimento de primeira e última milha para conexão com uma estação

5. RESULTADOS

A partir dos resultados exportados através do “Gerenciador de saída” do simulador, foi realizada uma análise de agrupamentos (também conhecida como análise de “clusters”) para estudar comportamentos semelhantes entre as observações, formando grupos com características homogêneas internamente e heterogêneas entre eles em relação às variáveis escolhidas. Com relação aos veículos programados, os agrupamentos foram realizados em função do número de atendimento e períodos de ociosidade, enquanto as viagens foram agrupadas por custo generalizado, tempo de espera e desvio. Não há relação direta entre os grupos de veículos formados e os resultados das viagens.

O experimento no corredor linear foi realizado em um período de operação de 4 horas, o que gerou a necessidade de 50 veículos com capacidade para 3 passageiros para atender as 300 solicitações por hora. Foram formados cinco grupos de veículos com características homogêneas em relação à ociosidade antes (inicial) e depois do primeiro atendimento (operacional). A ociosidade inicial ocorre principalmente pelo período necessário para o sistema aquecer (o chamado período de *warm up* de uma simulação). Já a ociosidade operacional pode ser justificada por inúmeros fatores, tais como demanda baixa, posicionamento dos veículos deficiente, entre outros.

A Figura 2 apresenta os resultados desse experimento. Observando os principais clusters formados (1, 2, 3 e 4), é possível notar que a principal variável que contribuiu para a formação dos mesmos foi a ociosidade média inicial. Cerca de 30% dos veículos tiveram a sua primeira solicitação alocada decorridos, em média, 40 minutos da simulação, enquanto para 68% dos veículos isso ocorreu até os primeiros 20 minutos. Outro fator importante a se observar é a ociosidade operacional: todos tiveram menos que 30 minutos sem passageiros durante o experimento. Essas ociosidades refletem no custo por passageiro, que teve uma média geral de R\$ 8,63 para viagens com distâncias diretas de aproximadamente 3 km. Os demais resultados apresentaram valores similares e satisfatórios considerando a capacidade dos veículos e duração do experimento, obtendo uma ocupação média de 1,77 passageiros enquanto o veículo esteve ocupado.

Ademais, o cluster de número zero apresentou resultados destoantes, devido ao seu baixo número de atendimentos e alta ociosidade, o que, conseqüentemente, levou a um maior custo

médio por passageiro. No entanto, esse *cluster* corresponde a apenas um único veículo, o qual teve sua primeira requisição alocada aos 44 minutos da simulação, e durante às 1,78 horas em que esteve em operação atendeu apenas 16 passageiros, o que resultou numa ocupação média de 1,82 passageiros.

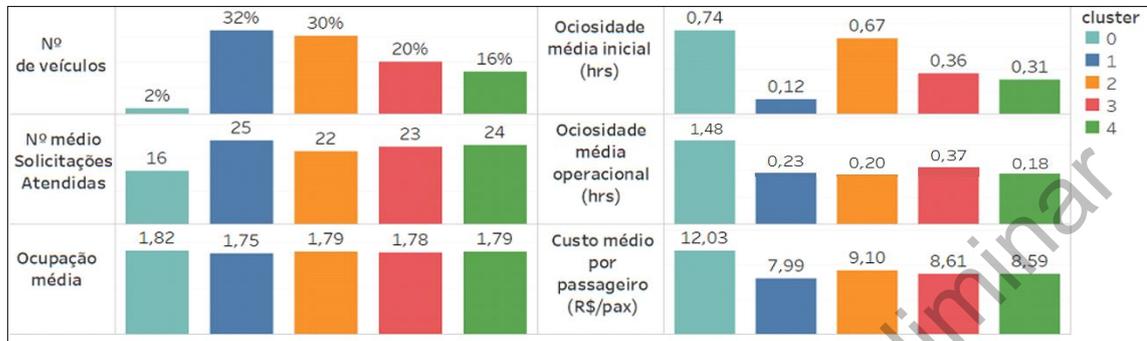


Figura 2: Resultados operacionais do corredor linear (veículos com capacidade para 3 pax)

Quanto aos resultados efetivos em termos de nível de serviço (Figura 3), observa-se que apenas 7% das viagens apresentaram desvios e tempos de espera próximos aos limites estabelecidos, gerando custos generalizados de 61 minutos em média. Cerca 68% das viagens tiveram desvios médios em torno de 35% em relação às viagens diretas. Por outro lado, somente 23% tiveram tempos de espera médios de 4 minutos, enquanto os demais apresentaram médias acima de 7 minutos. Contudo, os resultados ainda são compatíveis com o que é atualmente oferecido por serviços de transporte compartilhados existentes.

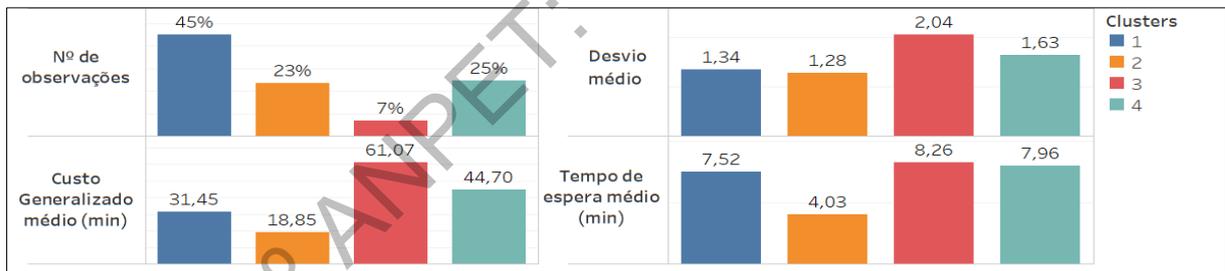


Figura 3: Resultados em relação ao nível de serviço

Já o experimento em última milha no entorno de uma estação de metrô foi realizado para um período de operação de 6 horas, o que gerou a necessidade de 425 veículos com capacidade para 3 passageiros para atender as 2500 solicitações por hora. Foram formados quatro grupos de veículos com características homogêneas em relação à ociosidade antes (inicial) e depois do primeiro atendimento (operacional). A Figura 4 apresenta os resultados operacionais da simulação.

O *cluster* de número zero é caracterizado pelo baixo número de atendimentos realizados e, conseqüentemente, grande ociosidade. Em média, esses veículos atenderam 11 solicitações durante as primeiras horas de simulação, gerando uma ocupação média de 1,94 passageiros quando ocupados. Quando esses 24 veículos entram no longo período de ociosidade operacional, todos os outros 401 veículos já tinham sido alocados pelo sistema, confirmando a assertividade do sistema ao requisitar novos veículos. Como a prioridade é dada sempre aos veículos ocupados, essa ociosidade se deve à falta de mais solicitações próximas, que outros

veículos não pudessem atender. De qualquer forma, esse grupo de veículos corresponde à apenas 6% do total.

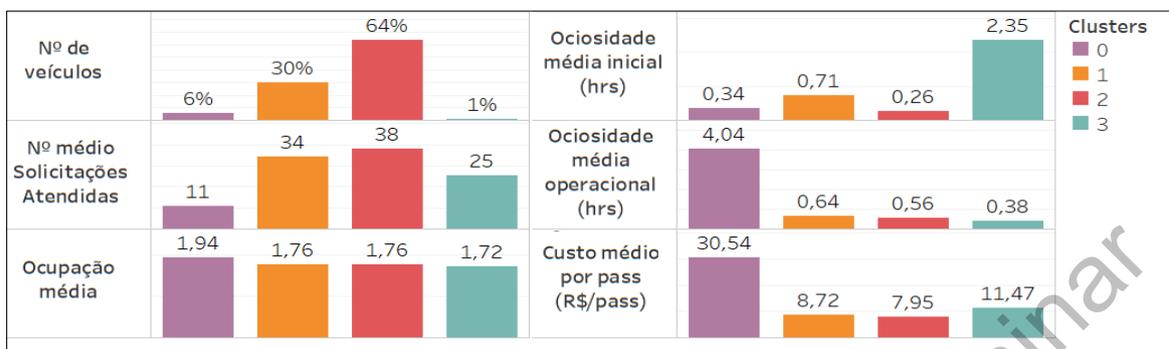


Figura 4: Resultados operacionais para o transporte de última milha (capacidade 3 pax)

Em consequência do baixo número de atendimentos, esses veículos apresentaram uma maior percentagem média de distância percorrida vazio em relação ao total e um maior custo médio por passageiro. Como um veículo só trafega vazio para ir em direção a uma solicitação, ou para voltar ao seu ponto de partida, é normal que essa percentagem diminua à medida que mais solicitações sejam atendidas seguidamente uma da outra. Nesse caso, como também foi pequena a distância percorrida para os atendimentos, maior a representatividade da distância percorrida vazio no total. Quanto ao custo, também foi influenciado pelo baixo número de atendimentos, fazendo com que a parcela fixa fosse dividida por menos passageiros. Como houve um grande período de ociosidade, o custo desse tempo teve que ser dividido entre os usuários atendidos.

O *cluster* nº 3, por sua vez, corresponde aos resultados de 3 veículos que destoram dos demais devido à sua longa ociosidade inicial, em torno de 2,35 horas em média. Esses veículos têm seus pontos de partida posicionados para atender as extremidades da região, área menos privilegiada de oferta em comparação à região mais central. Assim, quando não havia veículos em rota disponíveis, esses foram alocados e, a partir de então, mantiveram uma boa quantidade de atendimentos de 25 solicitações em média, e ocupação média de 1,72. Como esses veículos apresentaram menor período de ociosidade e maior número de atendimentos em relação ao *cluster* nº 0, a percentagem de distância percorrida vazio e o custo médio por passageiro foram menores.

O *clusters* nº 1 e nº 2 foram os conjuntos mais representativo de veículos, correspondendo à 94% no total. A diferença mais significativa entre eles é o período de ociosidade inicial: enquanto o primeiro demorou em média 0,76 horas para realizar o primeiro atendimento, o segundo foi de apenas 0,26 horas. Consequentemente, o primeiro grupo apresentou um número de atendimentos um pouco menor, porém as ocupações médias foram equivalentes. Considerando essa ociosidade inicial como um período normal de aquecimento do sistema, esses veículos apresentaram um ótimo desempenho operacional. Durante toda a simulação eles realizaram sucessivos embarques e desembarques, com pouca ociosidade. Como formam o conjunto de veículos mais expressivos, em termos de ociosidade e ocupação, esse cenário pode ser considerado viável do ponto de vista do operador.

Do ponto de vista dos passageiros, também foram observados resultados satisfatórios e condizentes com o nível de serviço proposto (Figura 5). As observações do *cluster* nº 4 foi o que apresentou o pior custo generalizado. Esse grupo representa 17% das viagens, com desvio

médio igual a 2 vezes o percurso de uma viagem direta, e tempo de espera de 9,45 minutos. Esses resultados são próximos aos limites estabelecidos pelo sistema; porém, ao mesmo tempo, representam o melhor aproveitamento dos veículos. O *cluster* nº 3, por outro lado, foi o que apresentou os melhores resultados, representando 20% das viagens. Seu tempo de espera médio foi de 3,5 minutos, e desvio médio de 1,26 acrescido ao tempo de viagem direta, gerando um custo generalizado de 20,91 minutos. O *cluster* nº 2 teve pouca representatividade (6%) se assemelhando com o *cluster* nº 4. A diferença deste é o menor tempo de espera, gerando consequentemente um menor custo generalizado. O *cluster* nº 1 teve a maior representatividade, com 56% de todas as viagens. Essas observações tiveram tempo de espera médio próximo ao limite, porém não apresentou tanto desvio. Essa combinação gerou um custo generalizado razoável de 35 minutos.

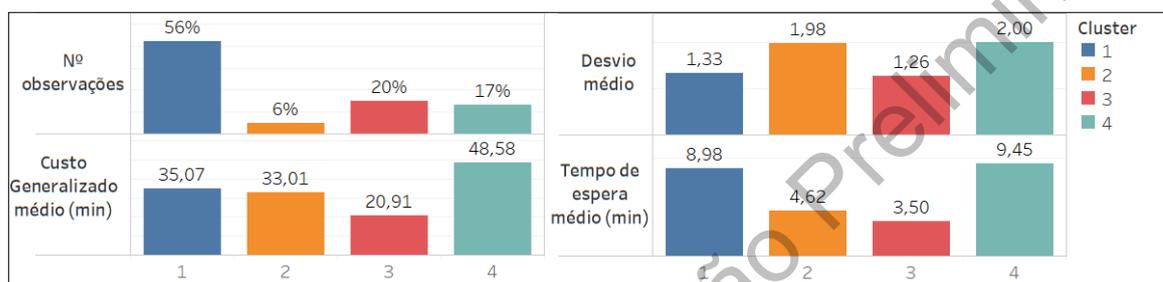


Figura 5: Resultados em relação ao nível de serviço

É frequente o uso de vans para serviços de compartilhamento de viagem, tais como o Moia, Bridj e CityBus, com capacidades de até 15 passageiros. Dessa forma, foram analisados quais são os impactos da alteração da capacidade dos veículos com 6 e 9 passageiros. Os experimentos também foram realizados em um período de operação de 6 horas, gerando quatro *clusters* com representatividades e comportamentos semelhantes ao observado no experimento anterior.

Aumentando a capacidade para 6 passageiros, foram necessários 352 veículos para o atendimento da demanda, representando uma redução de 17%. O *cluster* nº 0, formado por veículos que atenderam um menor número de solicitações, novamente apresentou um longo período de ociosidade, dessa vez mais distribuído entre antes e depois do primeiro atendimento. Já o *cluster* nº 3 apresentou uma melhora significativa em relação à ociosidade. No cenário anterior, foi observado, em média, 2,35 horas de ociosidade antes do primeiro atendimento e 0,38 horas depois, somando 2,73 horas no total. Neste novo experimento, foi observado 1,26 horas de ociosidade média total, sendo que a maior parcela (0,92 h) foi observada após o primeiro atendimento. Comparando os dois experimentos, percebe-se, então, que há uma maior quantidade de veículos iniciando tardiamente o primeiro atendimento (de 1% para 5% do total dos veículos).

Quanto aos *clusters* 1 e 2, assim como o cenário anterior, também formam os conjuntos mais expressivo de veículos, apresentando os melhores resultados do ponto de vista do operador. Com o aumento da capacidade, foi possível atender uma maior quantidade de solicitações por veículo (41 e 45 solicitações em média), aumentando também sua ocupação média para (2,13 e 2,19 passageiros). E em relação à ociosidade, também foi observada uma redução (de 0,56 para 0,30 horas em média) após o primeiro atendimento.

Com o aumento da capacidade para 9 passageiros, foram necessários 346 veículos, apenas 6 a menos do que o cenário anterior. Com o aumento ainda maior na capacidade, os resultados mais importantes foram a redução do número de veículos com altas ociosidades e a redução do período de ociosidade total médio (de 1,19h para 0,84h). Os veículos que já apresentavam baixa ociosidade não sofreram alterações relevantes nos resultados em geral, a não ser em relação ao custo médio por passageiro que, principalmente em função do custo de um veículo de maior porte, teve um aumento em 17%. Portanto, apesar desse cenário proporcionar uma melhora operacional em um conjunto pequeno de veículos, ele aumenta os custos médio por passageiro em 97% dos veículos.

A Tabela 1 apresenta uma comparação do nível de serviço entre os experimentos de última milha para diferentes capacidades. O aumento de 3 para 6 lugares gerou aumentos de 10% nos custos generalizado, desvios e tempos de espera médios, e uma redução de 20% no custo médio por passageiro. Com o aumento para 9 lugares, houve uma redistribuição completa das viagens entre os *clusters*, porém em média não houve alteração significativa nos valores das variáveis analisadas, a não ser um aumento do custo médio por passageiro. Visto que não há ganhos significativos na operação ou em nível de serviço efetivo, a adoção de veículos de maior porte para a demanda simulada não é vantajosa.

Tabela 1: Comparação do nível de serviço efetivo em função da capacidade do veículo

Capacidade	Representatividade do cluster (%)				Custo generalizado médio (min)	Desvio médio	Tempo de espera médio (min)	Custo médio por pax (R\$/pax)
	1	2	3	4				
3	56	6	20	17	34,45	1,48	7,69	9,48
6	55	9	15	21	37,24	1,60	8,26	7,78
9	32	40	19	9	37,39	1,61	8,28	9,15

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um modelo de simulação e otimização que foi aplicado a um serviço DRT sob diferentes cenários operacionais. Esse estudo justifica-se pelos altos custos de implementação de serviços DRT, permitindo delimitar estratégias operacionais que garantam performance adequadas e que tornem viável o investimento nesses sistemas.

De modo geral, os experimentos realizados demonstram a viabilidade desse serviço. Tanto no caso do corredor de transporte, quanto em última milha, a taxa de demanda adotada foi suficiente para garantir baixa ociosidade e uma ocupação média dos veículos razoável, o que consequentemente contribuiu para que os custos médios por passageiros serem compatíveis com o que se oferece atualmente nesse mercado (por Uber essas mesmas viagens custariam em entre 7 a 18 reais). Esses custos ainda podem ser reduzidos com a adoção de alternativas para atender os períodos de ociosidade. Foi considerado para a estimativa desses custos por hora uma utilização de 8 horas por dia, 22 dias úteis por mês. Caso esses veículos fossem utilizados, por exemplo, aos finais de semana, esses custos poderiam ser mais bem diluídos entre todos os usuários, tornando o serviço mais atrativo. Também se mostrou importante a identificação do período de ociosidade inicial para definir estratégias de disponibilização e realocação dos veículos ao longo do tempo.

Muitos serviços de transporte compartilhado foram descontinuados, principalmente aqueles que operavam com veículos de porte, com até 15 lugares. Enquanto isso, a Uber e o Via continuam oferecendo esses serviços em automóveis de até seis lugares. Isto posto, cabe analisar se é

justificável o investimento em veículos de maior porte tendo em vista a demanda de viagens e o nível de serviço que se espera alcançar. Os experimentos de última milha realizados com veículos para 6 passageiros apresentaram ganhos em relação ao de capacidade para 3 passageiros. No entanto, com veículos para 9 passageiros não foram obtidas vantagens significativas em operação ou em nível de serviço efetivo, gerando apenas custos mais altos por passageiro.

Para estudos futuros, recomenda-se o estudo do impacto da variação da demanda nos resultados apresentados. Com a redução da demanda presume-se uma maior ociosidade dos veículos, o que aumenta os custos por passageiro. Do ponto de vista do usuário, por outro lado, as condições de tempo de espera e desvios seriam mais favoráveis. Já com o aumento da taxa de demanda, poderá ser justificável a adoção de veículos com maiores capacidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., Rus, D. (2017) On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (3) pp.462-467. DOI:10.1073/pnas.1611675114.
- Brake, J., Mulley, C. e Nelson, J. (2006). *Good Practice Guide for Demand Responsive Transport Services using Telematics*. Newcastle upon Tyne, University of Newcastle upon Tyne, School of Civil Engineering and Geosciences.
- Chariot (2018) Site institucional. Disponível em: <<https://www.chariot.com/>>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- Clewlow, R. R. e Mishra, G. S. (2017) *Disruptive Transportation; The Adoption, Utilization, and Impacts of Ride-Hailing in the United States*. Institute of Transportation Studies. University of California-Davis. Research Report UCD-ITS-RR-17-07.
- Cordeau, J e G. Laporte (2007) The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research* n° 153, p. 29–46. DOI 10.1007/s10479-007-0170-8. 2007.
- HSL - Helsinki Regional Transport Authority (2016) *Kutsuplus – Final Report 2016*. Disponível em: <https://www.hsl.fi/sites/default/files/uploads/8_2016_kutsuplus_finalreport_english.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2018.
- Lee, K. T.; Lin, D. J. e Wu, P.J. (2005) Planning and design of a taxipooling dispatching system. *Transit: Bus, Rural Public and Intercity, and Paratransit*, Transportation Research Record. Transportation Research Board of the National Academies, p. 86–95.
- Mageean, J. e Nelson, J. (2003). "The evaluation of demand responsive transport services in Europe." *Journal of Transport Geography* 11(4): 255-270.
- Martinez, L. M., G. H. A. Correia, e J. M. Viegas (2015) An Agent-Based Simulation Model 14 to Assess the Impacts of Introducing a Shared-Taxi System: An Application to Lisbon 15 (Portugal). *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 49, No. 3, 2015, pp. 475–495. 16. DOI:10.1002/atr.1283.
- Metrô (2019) *Entrada de Passageiros por Linha - Maio/2019*. Portal da governança corporativa e transparência do Metrô. Disponível em: <<https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/demanda>>
- Pastor, N. (2014) *The feasibility of citywide public DRT: Door-to-door bus service in Tacoma*. Student research and creative works, University of Puget Sound.
- Quadrioglio, L., Dessouky, M. M. e Ordóñez, F. (2008). "A simulation study of demand responsive transit system design." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42(4): 718-737.
- Ronald, N., Thompson, R. G., Haasz, J., & Winter, S. (2013). Determining the viability of a demand-responsive transport system under varying demand scenarios. Paper presented at the proceedings of the 6th ACM SIGSPATIAL international workshop on computational transportation science, Orlando, FL, USA.
- TomTom International BV (2017). *TomTom traffic index: Measuring congestion worldwide* Disponível em: <https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL>. Acesso em: 26 mar.2018.
- Uber (2018) *uberPOOL: Mais passageiros. Mais viagens*. Site institucional. Disponível em: <<https://www.uber.com/pt-BR/drive/sao-paulo/resources/uberpool/>>. Acesso em: 05 jul.2018
- VIA (2017) *Building the Operating System for the future of transportation*. Site institucional.
- Westervelt, M., Huang, E., Schamk, J., Borgman, N., Fuhrer, T., Peppard, C., Narula-Woods, R. (2018) *Up-routed: Exploring microtransit in the United States*. Eno Center for Transportation.