Custos e Benefícios de Viagens Compartilhadas em um Sistema de Transporte Multimodal

Átila M. Silva Jr[1], Humberto T. Marques-Neto[2], Jussara M. A. Gonçalves[1]

[1]Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Brazil

[2]Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) – Brazil

{amsj,jussara}@dcc.ufmg.br, humberto@pucminas.br

Abstract. *A multimodal system allows passengers to travel by different modalities of transportation (e.g., taxi, bus, and subway). The problem is how to combine taxi with transit modals establishing a compromise between travel time and cost. The proposed solution is to allow taxi carry transit passengers from a bus or subway stop to their destination. To evaluate this proposal, we analyzed real trip data of different modalities generated in New York City. The results show that it is economically possible to integrate taxi with transit saving transit travel time and taxi travel cost.*

Resumo. *Em um sistema de transporte multimodal os passageiros se locomovem em centros urbanos utilizando diferentes modalidades de transporte (e.g., táxi, ônibus e metrô). O problema é como combinar o táxi com o sistema de transporte coletivo (ônibus e metrô) estabelecendo um compromisso entre custo e duração das viagens. A solução proposta é permitir que táxis busquem passageiros de transporte coletivo em estações de parada e os leve ao destino. Para avaliar essa proposta foram analisados dados reais de viagens realizadas na cidade de Nova Iorque. Os resultados mostraram que é possível integrar esses modais de forma que o passageiro de transporte coletivo economize tempo de viagem e o passageiro de táxi economize no valor da corrida.*

1. Introdução

Grande parte dos sistemas de transporte público são compostos pelo sistema de transporte coletivo e pelos serviços de táxi. O sistema de transporte coletivo é composto por diferentes modalidades (por exemplo, ônibus, metrô e trem) que se conectam por meio de estações e pontos de baldeação e formam uma grande rede com pontos de embarque e desembarque e horários previamente determinados. Diferentemente, o serviço de táxi possui rotas flexíveis definidas pelos passageiros que iniciam um deslocamento em qualquer local da cidade e o trajeto pode variar de acordo com as condições de trânsito e preferência dos passageiros até o destino desejado. Esses sistemas se complementam para atenderem as necessidades de deslocamento das pessoas em um centro urbano.

O sistema de transporte coletivo tende a ser mais barato, pois transporta um grande número de passageiros em uma mesma viagem. Além disso, possui itinerário e horário fixos que facilitam o planejamento da viagem pelos passageiros. Em contrapartida, os deslocamentos tendem a ser mais demorados se comparados com o transporte realizado em veículos de porte menor, como os táxis. Por outro lado, as viagens de táxi tendem a

ser mais rápidas, uma vez que os motoristas podem evitar vias congestionadas e buscar alternativas que agilizam o transporte dos passageiros. Essas características se estendem a serviços de transporte similares como Uber [1] e Cabify [2], os quais não fazem parte do escopo deste trabalho.

Diante dessas alternativas de transporte, neste artigo é investigada uma estratégia de integração de diferentes modalidades de transporte que visa explorar tanto os benefícios do transporte coletivo quanto do serviço de táxi. A estratégia proposta permite que os passageiros combinem, em uma mesma viagem, o transporte coletivo com o táxi compartilhado. Sendo assim, o passageiro planeja sua viagem como sendo realizada com um dos modais (ônibus, metrô ou táxi) e manifesta seu interesse em realizar uma integração, desde que tempo ou dinheiro seja poupado na viagem. O sistema proposto com esta estratégia irá pesquisar por viagens em andamento realizadas com o modal diferente do que está sendo usado pelo passageiro naquele momento e deverá selecionar as viagens em curso que podem proporcionar economia de tempo ou dinheiro para os passageiros provenientes de ambos os modais.

Para validar essa proposta foram analisados dados públicos de viagens de transporte coletivo e de táxi realizadas no mesmo período na cidade de Nova Iorque. Primeiramente, as rotas dessas viagens foram calculadas considerando as vias urbanas, horários e posições das estações de transporte coletivo. Esses dados foram caracterizados a fim de encontrar indícios que a integração dos modais fosse viável. Em seguida, foi realizado o casamento das viagens para identificar pares de viagens de transporte coletivo e de táxi que poderiam ser integradas considerando aspectos temporais e espaciais. Foram avaliadas, também, diferentes políticas de precificação tomando como base o cálculo dos preços das viagens de táxi individuais. Por último, foi proposta uma função de otimização que escolhe os melhores pares de viagens para o compartilhamento, considerando tanto a duração quanto o custo total das viagens.

Os resultados mostraram que a integração entre o transporte coletivo e o serviço de táxi é evidenciada visto que as viagens realizadas por esses modais se interceptam no tempo e no espaço. Isso pode ser observado nas regiões de maior concentração das origens e destinos e nos momentos em que esses serviços foram demandados. Além disso, mais de 40% dos passageiros de táxi economizaram no mínimo 40% no valor da viagem enquanto 40% dos passageiros de transporte coletivo economizaram no mínimo 20% no tempo da viagem para uma política de precificação na qual o passageiro de transporte coletivo paga a taxa inicial da viagem e o restante é dividido entre os passageiros de transporte coletivo e táxi.

O restante do trabalho está dividido como segue. Na Seção 2 serão discutidos os estudos sobre sistemas de transporte multimodais e de compartilhamento de rotas. Na Seção 3 serão apresentados a descrição do serviço e o algoritmo proposto para o casamento de rotas. Na Seção 4, o conjunto de dados utilizados para avaliação, uma caracterização desses dados e os resultados obtidos serão apresentados. Por último, na Seção 5 serão discutidas algumas conclusões e trabalhos futuros.

[1] https://www.uber.com/
[2] https://cabify.com/

2. Trabalhos Relacionados

Utilizar vários modais é uma possibilidade para os passageiros se locomoverem em regiões metropolitanas onde são disponibilizados os mais diversos serviços de transporte. Nesse sentido, muitos esforços são realizados para se desenvolver modelos que integrem diferentes modais em um único sistema [Gholami and Mohaymany 2012, Wang et al. 2014, Cangialosi et al. 2016]. Alguns trabalhos são voltados ao planejamento do transporte urbano levando em consideração os modais táxi e ônibus. [Gholami and Mohaymany 2012] tiveram como objetivo alocar um serviço similar ao táxi lotação (*taxi khattee*) e as linhas do transporte coletivo de acordo com a densidade populacional e a capacidade dos veículos. De outra forma, no estudo realizado por [Xi et al. 2015], o posicionamento das estações de táxi e ônibus é avaliado de forma a agilizar a integração entre esses modais.

Estudos que avaliam o compartilhamento de rotas levando em consideração sistemas de transporte multimodais também estão disponíveis na literatura. Enquanto o compartilhamento de viagens promete maior eficiência na ocupação dos automóveis [Huang et al. 2014] e economia no valor da viagem [Asghari et al. 2016], o transporte multimodal permite que diferentes modalidades de transporte sejam utilizadas em uma mesma viagem de maneira que a infraestrutura de transporte urbana seja explorada de uma forma mais ampla [Gholami and Mohaymany 2012, Cangialosi et al. 2016].

Em [Wang et al. 2014], os autores aplicam o conceito de *Agent-based Coalition Formation* no sistema de transporte multimodal. Dessa forma, o itinerário de um passageiro é visto como uma composição de seguimentos que nem sempre são referentes ao mesmo modal, os passageiros que têm itinerários com seguimentos em comum podem compartilhar essa parte do trajeto. No entanto, apesar desse trabalho avaliar o *taxisharing* multimodal, não se trata os casos em que passageiros em diferentes modais (e.g., um no táxi e outro no ônibus) poderia compartilhar a mesma corrida.

[Cangialosi et al. 2016] também propôem o compartilhamento multimodal. Nesse trabalho, as trajetórias, que poderiam ser compostas por vários modais, deveriam ser previamente agendadas para que um algoritmo de casamento pudesse encontrar a melhor combinação de rotas semelhantes. No entanto, o agendador de viagens proposto por eles também não permite que diferentes modais sejam integrados em uma mesma viagem.

Em [Masri et al. 2017] é apresentada uma proposta onde é possível combinar em uma mesma viagem o transporte coletivo com o táxi compartilhado. Nessa proposta, o segmento compartilhado é escolhido iterando sobre a rota de transporte coletivo e substituindo diferentes segmentos dessa rota por viagens de automóvel compartilhado. Todavia, os autores não consideram o ponto de vista do passageiro proveniente do táxi ao avaliarem a viabilidade da proposta e utilizam uma base de dados sintética gerada aleatoriamente para avaliação, diferente do que está sendo proposto neste artigo.

3. Compartilhamento de Corridas em um Sistema de Transporte Multimodal

3.1. Descrição do Serviço Proposto

Os pré-requisitos básicos para funcionamento do serviço proposto de compartilhamento de corridas em um sistema de transporte multimodal são os seguintes: (i) o sistema deve ter registrado todas as rotas das linhas de transporte coletivo que circulam na região de

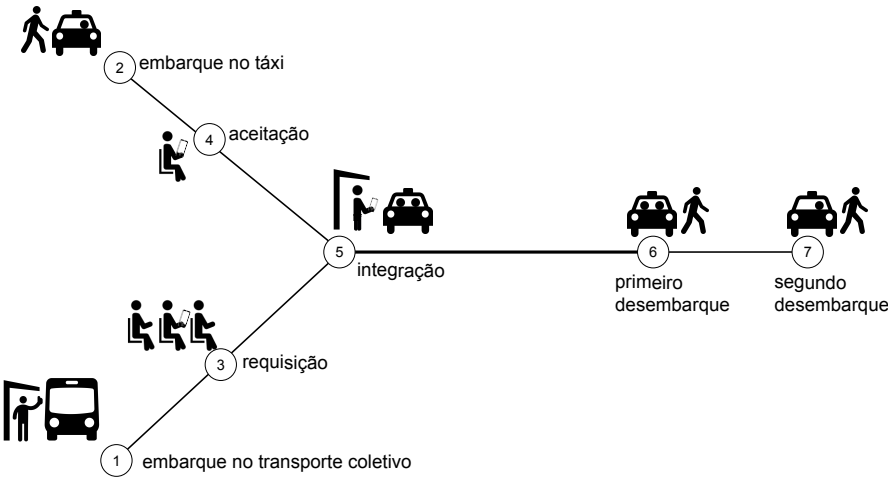

Figura 1. Diagrama de integração de viagens de táxi com transporte coletivo.

atuação, assim como os horários que cada veículo irá passar por determinado ponto e (ii) os motoristas de táxi, os passageiros de transporte coletivo e de táxi devem possuir um *smartphone* com dispositivo de GPS integrado e conectado à internet. O diagrama da Figura 1 ilustra o funcionamento do serviço proposto.

Satisfeitos os pré-requisitos, o fluxo de ações do compartilhamento é o seguinte. Primeiro, usando a aplicação de *smartphones* (1) o passageiro de transporte coletivo planeja sua viagem e embarca no veículo de determinada linha, (2) o passageiro de táxi solicita por uma viagem e embarca no automóvel atribuído a ele. Antes de embarcar, o passageiro de táxi informa qual o atraso máximo e a economia mínima no valor da viagem compartilhada, caso exista alguma. As ações (1) e (2) não necessariamente ocorrerão nessa ordem, ou seja, o passageiro de táxi pode embarcar antes do passageiro de transporte coletivo.

Em determinado momento de sua viagem (3), o passageiro de transporte coletivo faz uma busca por viagens de táxi compartilhado informando a economia de tempo mínima aceitável e o valor extra máximo a pagar pelo compartilhamento. De posse desses dados, o sistema irá enviar requisições para os passageiros das viagens de táxi (4) que estão em andamento e satisfazem os requisitos dos passageiros de transporte coletivo. Caso o passageiro de táxi aceite a requisição, o sistema irá enviar para o passageiro de transporte coletivo a estação que ele irá desembarcar.

Após desembarcar no ponto ou estação determinada pelo sistema (5), o passageiro de transporte coletivo espera pelo veículo selecionado para viagem compartilhada. Caso esse veículo tenha chegado antes do desembarque, ele deve esperar pelo passageiro de transporte coletivo. Todos os usuários podem acompanhar em tempo real a posição dos passageiros que eles estão a espera, até o embarque dos passageiros provenientes do transporte coletivo ser confirmado pelo motorista do táxi.

A partir do momento que o embarque do passageiro de transporte coletivo for confirmado, o deslocamento compartilhado é realizado (treho 5-6). O deslocamento compartilhado ocorrerá até o momento em que os passageiros com o destino mais próximo ao ponto onde ocorreu a integração desembarcarem. O primeiro desembarque (6) pode

ser realizado tanto pelos passageiros provenientes do táxi, quanto por aqueles que vieram do transporte coletivo. Por fim, os passageiros com o destino mais distante do ponto de integração irão realizar uma viagem privada (trecho 6-7) desde o primeiro desembarque até a posição de destino (7). Após o desembarque dos últimos passageiros espera-se que os passageiros do transporte coletivo tenham economizado no tempo da viagem e os passageiros do táxi tenham economizado no valor pago para o serviço de táxi.

3.2. Descrição do Algoritmo

O algoritmo do serviço de compartilhamento de corridas em um sistema de transporte multimodal tem como entrada as posições de origem, destino e intermediárias das viagens dos passageiros de transporte coletivo e de táxi e o momento em que essas posições foram coletadas. O objetivo do algoritmo é obter as viagens de táxi que poderiam levar os passageiros de transporte coletivo ao destino mais rapidamente e de forma que os passageiros do táxi paguem menos pela viagem que faria individualmente. Para isso, é realizado o casamento das potenciais viagens para depois selecionar aquele com maior benefício.

Para realizar o casamento de viagens, primeiramente, se considera os aspectos temporais e espaciais das viagens. Dada uma viagem de transporte coletivo composta pelas posições de origem, destino e dos pontos de parada intermediários das linhas utilizadas pelo passageiro, seleciona-se as viagens de táxi em andamento que, desviando da rota original, poderiam transportar passageiros do transporte coletivo de algum dos pontos intermediários até a posição destino. Esse percurso deve ser realizado em um tempo inferior ao previsto caso ele tivesse completado a viagem somente de transporte coletivo.

Além dos aspectos temporais e espaciais, considera-se as estimativas de custo das viagens. O compartilhamento será interessante para o passageiro de táxi se ele pagar menos pela viagem compartilhada que ele pagaria caso viajasse de maneira privada. Para tanto, os passageiros provenientes do transporte coletivo deverão arcar com uma parcela da viagem compartilhada. O valor dessa parcela não pode ser grande demais, pois, inviabilizaria o compartilhamento para o passageiro de transporte coletivo. Além disso, o atraso gerado pelo desvio realizado pelo táxi para buscar o passageiro de transporte coletivo não pode ser demasiado pois inviabilizaria a integração para o passageiro de táxi.

Todos passageiros devem ser beneficiados para que o compartilhamento seja viável. O passageiro de transporte coletivo deve chegar ao destino mais rápido que se fosse somente de transporte coletivo e o passageiro de táxi deve pagar menos pela viagem compartilhada. Esses dois objetivos foram combinados na função de otimização a seguir.

$$\begin{aligned} \text{maximizar} \quad & (t_{colet}^{orig} - t_{colet}^{novo}) * (c_{taxi}^{orig} - c_{taxi}^{novo}) \\ \text{sujeito a} \quad & (t_{colet}^{orig} - t_{colet}^{novo}) > 0 \\ & (c_{taxi}^{orig} - c_{taxi}^{novo}) > 0 \end{aligned}$$

Primeiramente, nas restrições, serão selecionados os pares de viagens de transporte coletivo e táxi em que o passageiro de transporte coletivo teria alguma economia de tempo e o passageiro de táxi economizaria no valor pago pela viagem compartilhada. Satisfeitas essas restrições, as viagens em que a economia de tempo do passageiro de transporte coletivo seja máxima e o valor economizado na viagem pelo passageiro de táxi

também seja máximo serão selecionadas. Nessa função, assume-se que uma unidade de tempo é equivalente a uma unidade monetária.

O resultado desse processamento são pares de posições de transporte coletivo e de táxi. A posição de táxi é aquela a partir da qual o veículo irá se deslocar da rota original para buscar o passageiro de transporte coletivo no ponto de integração. A posição de transporte coletivo será o ponto/estação em que a integração ocorrerá, ou seja, onde o passageiro de transporte coletivo irá desembarcar para embarcar em uma viagem compartilhada com o passageiro de táxi.

4. Avaliação do Compartilhamento de Corridas em um Sistema de Transporte Multimodal

4.1. Conjunto de Dados

O conjunto de dados utilizado nos experimentos foram gerados por uma pesquisa de origem e destino realizada pela Agência de Transporte Metropolitano de Nova Iorque (MTA) no ano de 2008 [3]. A coleta deste conjunto de dados foi realizada do mês de maio a novembro de 2008 saltando o período de férias (27 de junho - 7 de setembro). A seguir, a Tabela 1 apresenta a quantidade de viagens por modal avaliado.

Modal	# de Viagens
Metrô	16.453
Ônibus	8.301
Metrô + Ônibus	4.093
Serviços táxi, carro e van	1.896

Tabela 1. Número de viagens por modal de interesse.

Ao todo são 28.847 viagens de transporte coletivo e 1.896 viagens de táxi e outros serviços de transporte de passageiros similares. Nesse conjunto de dados, as posições exatas (latitude e longitude) de origem e destino dos passageiros não foram divulgadas. Mas, os códigos dos setores censitários dessas posições foram disponibilizados. As posições de origem e destino das viagens foram consideradas, portanto, como sendo o centroide dos polígonos dos setores censitários. Os setores censitários possuem áreas de até cinco quilômetros quadrados.

4.2. Roteamento

As localizações das posições intermediárias das rotas dos passageiros não estão presentes no conjunto de dados original e são necessárias para identificação dos pontos de integração. Para obter essas posições, foi utilizado um serviço de planejamento de viagens denominado OpenTripPlanner [4]. Esse serviço calcula a melhor rota utilizando como base um mapa da região metropolitana extraído do OpenStreetMap [5] e os horários dos transportes coletivos extraídos dos arquivos GTFS que são fornecidos pelas agências de transporte metropolitano (e.g. MTA).

[3] http://web.mta.info/mta/planning/data-nyc-travel.html
[4] http://www.opentripplanner.org/
[5] https://www.openstreetmap.org/

As configurações padrão do OpenTripPlanner foram utilizadas para o cálculo das rotas. No processo de roteamento das viagens dos passageiros de transporte coletivo, foram selecionadas as melhores rotas, isto é, aquelas em que o passageiro percorre curtos percursos a pé, realiza poucas baldeações e chega ao destino mais rapidamente. As rotas selecionadas para o serviço de táxi foram aquelas em que o passageiro chegasse ao destino mais rapidamente. O OpenTripPlanner, implementa algumas heurísticas para agilizar esse processamento. Por isso, a rota obtida nem sempre será a ótima. Além disso, prováveis congestionamentos foram desconsiderados no cálculo das rotas.

4.3. Precificação

Como os dados utilizados para avaliação do serviço proposto são provenientes da cidade de Nova Iorque, a precificação utilizada para as viagens de táxi tem como referência as tarifas cobradas nessa cidade [6], consolidada na Tabela 2.

Descrição	Valor Cobrado
Custo Inicial	$ 2,50
Taxa por Corrida	$ 0,50
Custo por Milha	$ 2,50
Custo por Minuto Parado	$ 0,40
Custo Adicional Horário de Pico*	$ 1,00
Custo Adicional Noturno**	$ 0,50

* Segunda a sexta das 16 às 18 horas.
** Das 20 às 6 horas.

Tabela 2. Precificação dos táxis de Nova Iorque.

Ressalta-se que essa é a base de cálculo utilizado na cobrança de corridas individuais, isto é, sem o compartilhamento. Políticas de precificação diferentes devem ser adotadas nos cenários de compartilhamento, uma vez que, os desvios e tempos de espera por passageiros adicionais devem ser considerados. Sendo assim, a precificação da viagem compartilhada foi elaborada da seguinte maneira: os passageiros provenientes do táxi e aqueles que vierem do transporte coletivo irão pagar por uma fração da viagem. Esse pagamento será realizado de forma que a soma dos valores pagos por eles seja igual ao valor da viagem caso ela tivesse sido paga de maneira individual.

Portanto, o valor integral da corrida foi dividido em quatro partes: (a) valor da taxa inicial; (b) custo do segmento entre aceitação do taxista e embarque do passageiro de táxi, segmento 4-5 do diagrama da Figura 1; (c) custo do segmento compartilhado, segmento 5-6 da Figura 1; e (d) custo do segmento entre os destinos dos passageiros, segmento 6-7 da Figura 1. Os valores da taxa inicial e dos segmentos de rota podem ser divididos entre os passageiros de transporte coletivo e táxi, cada divisão diferente resulta em uma nova política de precificação.

4.4. Resultados

4.4.1. Caracterização das Viagens Realizadas por Diferentes Modais

No processo de caracterização, foram avaliados os atributos espaciais e temporais das viagens realizadas de transporte coletivo e por algum serviço de táxi. Foram selecionadas as

[6] http://www.nyc.gov/html/tlc/html/passenger/taxicab_rate.shtml

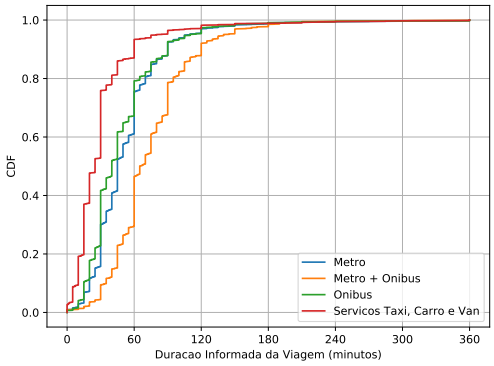

Figura 2. Duração Informada.

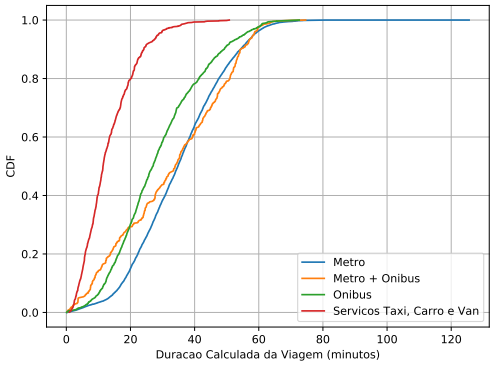

Figura 3. Duração Calculada.

viagens de transporte coletivo realizadas de metrô, ônibus ou utilizando os dois consecutivamente. Os serviços de táxi abrangidos pela pesquisa são o próprio táxi, carro particular e van de transporte de passageiros. A distribuição cumulativa das durações das viagens informadas pelos passageiros está presente no gráfico da Figura 2.

Como era de se esperar, as viagens de táxi são mais rápidas que as realizadas por algum transporte coletivo. As viagens realizadas de metrô e ônibus possuem durações aproximadas e quando ônibus e metrô são combinados as viagens tendem a ser mais demoradas. Essas durações são afetadas por uma série de fatores como, distância das viagens, tempo de espera nas estações de embarque, desvios e condições de tráfego.

Em seguida, as rotas das viagens foram calculadas como descrito na Seção 4.2. Os resultados são as rotas das viagens completas com posições intermediárias, data e hora da melhor rota, considerando as vias urbanas e horários em que os veículos de transporte público passaram pelas respectivas estações. Como não foram considerados atrasos decorrentes do trânsito e de imprevistos, as viagens tendem a ser mais rápidas. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 3.

Enquanto 80% das viagens de táxi informadas duram até trinta minutos, nas viagens calculadas, esse mesmo percentual é alcançado com uma duração máxima de vinte minutos, ou seja, cerca de dez minutos a menos. Essa diferença pode ser observada também para as viagens de transporte coletivo. Outro fator que pode ser observado é que a ordem de duração das viagens é mantida, exceto para a combinação de ônibus e metrô que nas viagens informadas estão mais demoradas que as demais e nas viagens calculadas estão entre as viagens realizadas somente de ônibus e somente de metrô.

As distâncias em linha reta entre a origem e destino das viagens foram calculadas para entender a relação entre distâncias das viagens e modal escolhido. Os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 4. Neste gráfico se pode observar que táxi e ônibus possuem distribuições acumuladas semelhantes e que são os modais utilizados para percorrer distâncias menores. Isso pode ser explicado pelo fato que o preço das viagens de táxi e duração das viagens de ônibus tendem a ser altos, inviabilizando viagens muito longas. Ainda neste gráfico observa-se que as viagens mais longas foram realizadas combinando metrô e ônibus.

A utilização dos serviços de transporte varia conforme a demanda ao longo do

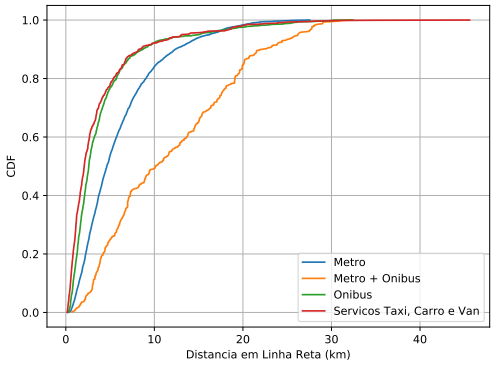

Figura 4. Distâncias em Linha Reta entre Origens e Destinos.

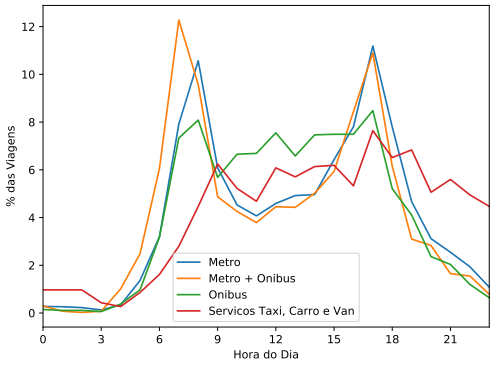

Figura 5. Demanda por hora do dia.

dia. O gráfico da Figura 5 mostra como as demandas pelos serviços de transporte se sobrepõem ao logo do dia. Pode-se perceber que existem dois picos nítidos nas viagens realizadas de metrô e combinando metrô e ônibus, esses picos foram registrados no início da manhã, quando as pessoas vão e voltam do trabalho. Diferentemente, nas viagens realizadas por serviços de táxi e de ônibus observa-se um crescimento no início do dia, existem algumas oscilações ao longo do dia e uma queda brusca na demanda no final do dia, essa queda demora mais a ocorrer para o táxi que são mais requisitados no período noturno.

A distribuição espacial das origens e destinos dos passageiros dos diferentes modais permite identificar as regiões onde esses eventos se concentram. A Figura 6 mostra como as origens e destinos dos passageiros de transporte coletivo e dos passageiros de táxi estão distribuídos na cidade de Nova Iorque no período de coleta dos dados. Cada mapa foi dividido em PUMAs (*Public Use Microdata Areas*) que são regiões definidas pelo Censo dos Estados Unidos para fornecer informações demográficas e estatísticas. Diferente dos setores censitários, que são a menor unidade territorial, a área de cada PUMA foi pensada para conter o equivalente a cem mil pessoas.

Na Figura 6, as origens e destinos das viagens dos passageiros de transporte coletivo estão na coluna da esquerda enquanto as origens e destinos dos passageiros de táxi estão na coluna da direita, as origens estão na linha acima dos destinos. Independente do modal, pode-se observar que as regiões de maior e menor concentração das origens são bastante semelhantes às regiões de concentração dos destinos. Isso porque os passageiros tendem a utilizarem o mesmo modal para ir e voltar de determinado destino. Outra característica que pode ser observada é que regiões de maior concentração das origens e destinos dos passageiros de transporte coletivo coincidem com as regiões de maior concentração das origens e destinos dos passageiros de táxi.

Todas essas características evidenciam que a integração entre o sistema de transporte coletivo e os serviços de táxi pode ser uma alternativa viável, uma vez que as viagens realizadas por essas diferentes modalidades se interceptam no tempo e no espaço. As diferentes características dessas modalidades podem ser combinadas com o objetivo de oferecer um serviço misto que combine os benefícios e amenize os pontos negativos de cada modal.

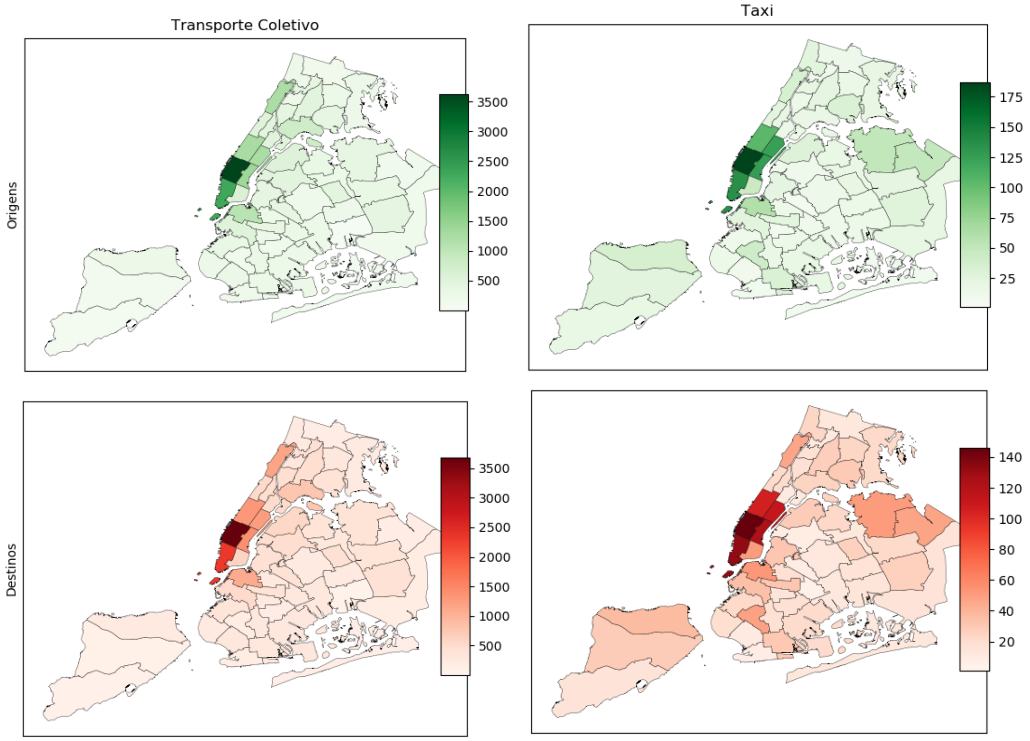

Figura 6. Distribuição espacial das origens e destinos dos Passageiros do transporte coletivo e táxi por PUMA (*Public Use Microdata Area*).

4.4.2. Casamento de Viagens

O casamento das viagens realizadas de transporte coletivo e de táxi foi realizado para avaliar quais os impactos da integração dessas diferentes modalidades de transporte. As viagens calculadas pelo OpenStreetMap foram utilizadas como entrada do algoritmo de casamento e como base para avaliação da proposta. Para o casamento de corridas foram considerados, primeiramente, os aspectos temporais e espaciais das viagens e posteriormente, as questões monetárias. Considerou-se que em todos os casamentos os táxis selecionados suportariam os passageiros provenientes do transporte coletivo e que os passageiros de táxi aceitariam o compartilhamento caso eles fossem beneficiados.

Para haver integração entre duas viagens é necessário que exista alguma interseção entre elas. Uma interseção nesse contexto é um ponto ou estação de transporte coletivo onde o passageiro de transporte coletivo possa desembarcar do veículo em que a viagem está sendo realizada e embarcar em uma viagem compartilhada com o passageiro de táxi. Uma interseção existe se as seguintes restrições foram satisfeitas: (i) o passageiro de transporte coletivo deve chegar ao ponto de integração antes que o passageiro de táxi chegue ao destino; (ii) o momento de aceitação do passageiro de táxi deve ser anterior ao momento de chegada do passageiro de transporte coletivo ao destino; (iii) o táxi deve ser capaz de chegar ao ponto de integração antes que ele chegaria ao destino do passageiro de táxi caso não compartilhasse a viagem e (iv) o passageiro de transporte coletivo deve chegar ao destino mais cedo com o compartilhamento que sem ele.

No casamento pode ser que mais de uma viagem de táxi seja selecionada para

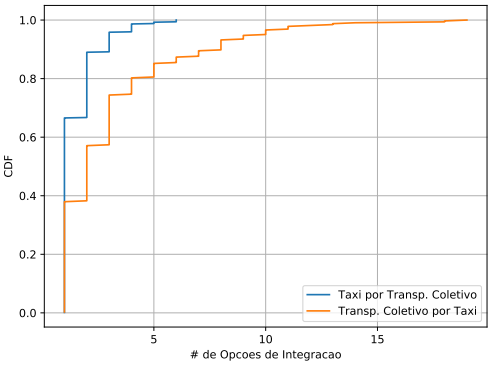

Figura 7. Opções de posições para a integração.

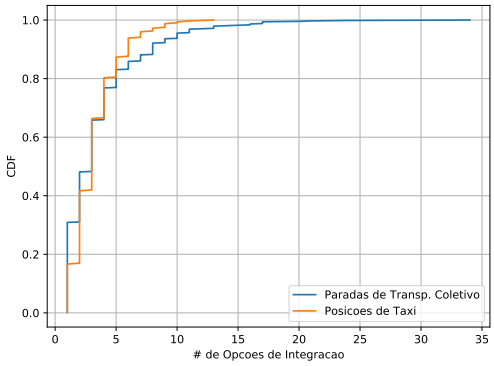

Figura 8. Opções de viagens para integração.

uma mesma viagem de transporte coletivo, assim como uma mesma viagem de táxi pode ser selecionada para atender mais de uma integração. O gráfico da Figura 7 apresenta a distribuição cumulativa do número de viagens de táxi selecionadas para atender uma viagem de transporte coletivo, curva azul, e o número de viagens de transporte coletivo selecionadas para cada viagem de táxi. Do total de 10.173 integrações possíveis, compostas por 324 viagens de táxi distintas e 673 viagens de transporte coletivo, pode-se perceber que existem mais opções de transporte coletivo para cada viagem de táxi que o contrário. Especificamente, enquanto aproximadamente 60% das viagens de táxi tem mais de uma opção para integração, pouco mais de 30% das viagens de transporte coletivo tem mais de uma opção. Isso revela que existem mais pessoas viajando de transporte coletivo em determinado momento que pessoas utilizando algum serviço de táxi.

As posições de táxi selecionadas para a integração representam as posições em que o passageiro de táxi aceita compartilhar sua viagem e a partir das quais ele desvia da rota original para se dirigir ao ponto de integração. Para agilizar o processamento, em uma mesma viagem de táxi foram consideradas as posições que estão há uma distância mínima de quinhentos metros. Para as viagens de transporte coletivo, as posições selecionadas são aquelas referentes ao ponto ou estação de parada do veículo da linha em que o passageiro está viajando. As posições dos percursos realizados a pé até o embarque, até o destino entre os pontos de integração não foram consideradas.

Dados os pares de viagens selecionados para o compartilhamento, pode ser que mais de uma posição de alguma viagem seja selecionada como opção para mesma integração. A Figura 8 apresenta a distribuição cumulativa do número de opções de paradas de transporte coletivo selecionadas por viagem, em azul, e do número de posições de táxi possíveis para a integração, em alaranjado. Em 70% das viagens de transporte coletivo existem mais de uma possibilidade de parada selecionada como possível para integração, nas viagens de táxi esse número é um pouco maior, superando os 80%.

Questões monetárias também foram consideradas no casamento das viagens como descrito na Seção 4.3. A política de precificação da corrida compartilhada divide o valor da viagem entre o passageiro do táxi e o passageiro de transporte coletivo. No serviço proposto o automóvel do táxi terá que realizar um desvio para pegar o novo passageiro proveniente do transporte coletivo e leva-lo ao destino. O valor dessa nova viagem que pode ser dividido entre os passageiros é composto por três partes: (a) o valor da taxa ini-

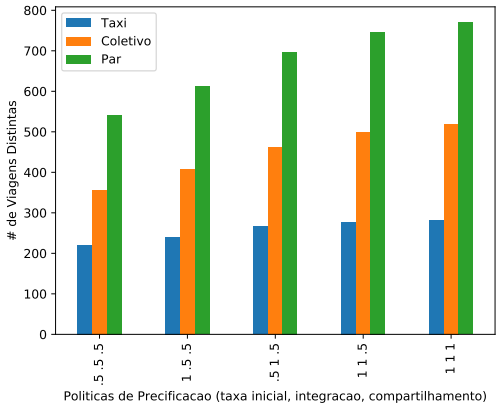

Figura 9. Precificação e número de viagens distintas.

cial da viagem, (b) o valor do trajeto realizado entre as posições de integração e (c) o valor do trajeto compartilhado. Na divisão proposta, o passageiro do transporte coletivo paga a totalidade de alguma dessas partes ou ele paga metade e o passageiro do táxi paga metade. O resultado da combinação dos fatores pagos em cada parte do valor compartilhado estão presentes no gráfico da Figura 9.

Nesse gráfico, cada conjunto de barras é resultado de uma política de precificação considerando que o passageiro de transporte coletivo pode pagar alguma das três partes sozinho ou ele pode dividir metade do valor com o passageiro do táxi. Ao todo são oito combinações possíveis, mas as combinações em que o passageiro de transporte coletivo pagava pelo trajeto compartilhado sozinho não foram consideradas, exceto no caso extremo onde o passageiro de transporte coletivo paga sozinho por todo o compartilhamento. Das cinco possibilidades restantes, pode-se perceber que quanto maior o percentual da viagem paga pelo passageiro do transporte coletivo, maior será o número de integrações possível. Esse comportamento ocorre porque ao calcular o preço das viagens compartilhadas aquelas em que o passageiro de táxi não economiza no valor pago pela viagem não são consideradas como viáveis e são excluídas do conjunto de corridas compartilháveis.

Em seguida, foram avaliadas a economia de dinheiro do passageiro de táxi, Figura 10, e a economia de tempo do passageiro de transporte coletivo, Figura 11. A Figura 10 mostra que quanto mais a política penaliza o passageiro de transporte coletivo com uma parcela maior para pagar, maior será a economia do passageiro de táxi. Considerando os casos extremos quando o passageiro do transporte coletivo paga metade da taxa inicial e metade do trajeto compartilhado em aproximadamente 75% o passageiro de táxi economiza no máximo 40% no valor que ele pagaria caso não optasse pelo compartilhamento. Quando o passageiro de transporte coletivo paga por todo o trajeto compartilhado a situação praticamente se inverte, em aproximadamente 65% das viagens compartilhadas o passageiro de táxi economiza no mínimo 40% no valor da viagem.

A Figura 11 retrata a economia de tempo do passageiro de transporte coletivo ao variar a política de precificação. Pode-se perceber que a economia de tempo desse passageiro não é muito influenciada pela política de precificação. Ao observar atentamente as distribuições cumulativas pode-se chegar a conclusão de pagando mais pelo trajeto compartilhado, mais tempo o passageiro de transporte coletivo tende a economizar. Observa-se também que em 40% dos compartilhamentos os passageiros de transporte

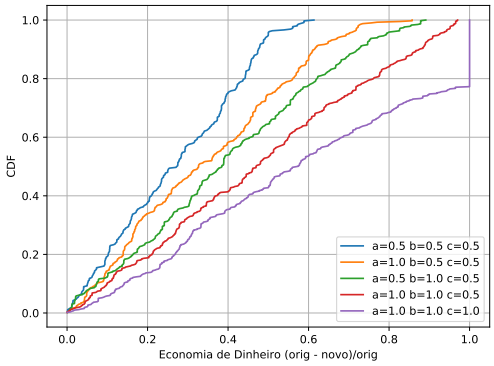

Figura 10. Precificação e economia de dinheiro para passageiro de táxi.

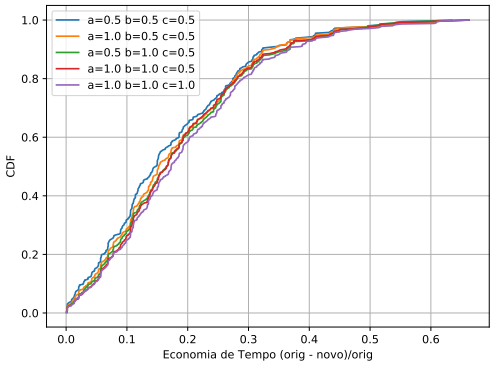

Figura 11. Precificação e economia de tempo para passageiro de transp. Coletivo.

coletivo economizam mais que 20% no tempo total da viagem.

Por fim, fixou-se a política de precificação como o passageiro de transporte coletivo pagando sozinho pela taxa inicial e dividindo pela metade os trajetos entre as posições de integração e o trajeto compartilhado e foram selecionados os casamentos de benefício máximo, conforme descrito na Seção 3.2. A partir dos resultados obtidos, foram calculados os custos e os benefícios para os passageiros de transporte coletivo, Figura 12, e para os passageiros de táxi, Figura 13 e a curva de tendência foi apresentada para cada caso.

Na Figura 12 o eixo x representa a economia de tempo em minutos e o eixo y, o custo da viagem em dólares para o passageiro de transporte coletivo. Pode-se observar que existe pouca variação em torno da curva de tendência. Sendo assim, esse resultado mostra que o passageiro de transporte coletivo paga em geral 3,45 dólares mais 1,87 dólar por minuto economizado.

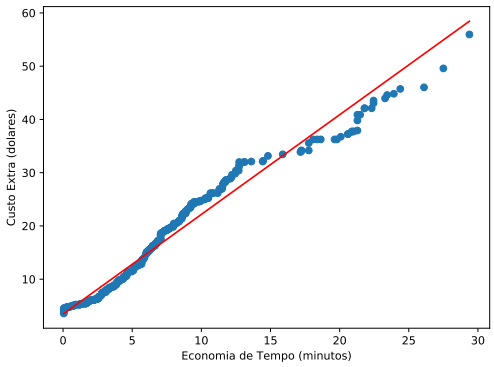

Figura 12. Transp. Coletivo (a=1, b=.5 e c=.5) y=1,87x+3,45.

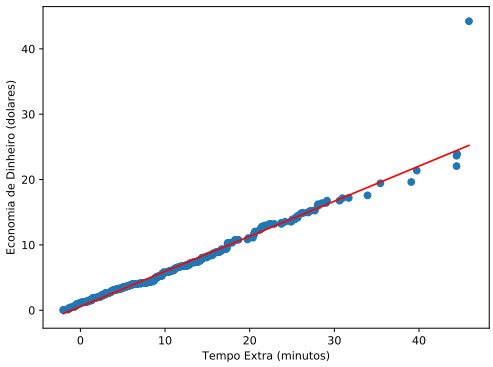

Figura 13. Táxi (a=1, b=.5 e c=.5) y=0,54x+0,57 .

Considerando a perspectiva do passageiro de táxi, na Figura 13, o eixo x representa o tempo extra da viagem e o eixo y, a economia no valor da viagem. Pode-se observar que os dados estão próximos da curva de tendência, exceto para um caso com cinco quilômetros de compartilhamento. Dessa forma, o passageiro de táxi começa economizando 0,57 dólar e para cada minuto de atraso ele recebe um incentivo de 0,54 dólar.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Combinar serviços de táxi com o sistema de transporte coletivo pode trazer benefícios para os passageiros provenientes de ambos os tipos de transporte. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi encontrar o cenário em que essa estratégia seja viável. Para tanto, foram analisados dados reais de viagens de transporte coletivo e táxi realizadas na cidade Nova Iorque. Após realizar uma caracterização dos dados, foi feito o casamento buscando por pares de viagens que poderiam ser integradas. Nessa busca foram considerados aspectos temporais, espaciais e monetários. Um casamento existe se os passageiros forem beneficiados de alguma forma, isto é, se o passageiro de táxi economizar no valor da viagem e se o passageiro do transporte coletivo economizar no tempo da viagem. Os resultados mostraram que mais de 40% dos passageiros de táxi economizaram no mínimo 40% no valor da viagem enquanto 40% dos passageiros de transporte coletivo economizaram no mínimo 20% no tempo da viagem para uma política de precificação na qual o passageiro de transporte coletivo paga a taxa inicial da viagem e o restante é dividido entre os passageiros de transporte coletivo e táxi.

Como trabalhos futuros pretende-se avaliar a combinação desses modais utilizando outros tipos de precificação (e.g., precificação dinâmica), combinar outros modais e estudar as características das viagens que favorecem a combinação entre modais.

6. Agradecimentos

Esta pesquisa é financiada pelo CNPq, CAPES e FAPEMIG-MASWeb/APQ-01400-14.

Referências

Asghari, M., Deng, D., Shahabi, C., Demiryurek, U., and Li, Y. (2016). Price-aware real-time ride-sharing at scale: An auction-based approach. In *Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 3:1–3:10.

Cangialosi, E., Febbraro, A. D., and Sacco, N. (2016). Designing a multimodal generalised ride sharing system. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(4):227–236.

Gholami, A. and Mohaymany, A. S. (2012). Analogy of fixed route shared taxi (taxi khattee) and bus services under various demand density and economical conditions. *Journal of Advanced Transportation*, 46(2):177–187.

Huang, Y., Bastani, F., Jin, R., and wang, X. S. (2014). Large scale real-time ridesharing with service guarantee on road networks. *VLDB Endowment*, 7(14):2017–2028.

Masri, A., Zeitouni, K., and Kedad, Z. (2017). Retry: Integrating ridesharing with existing trip planners. In *Proceedings of the 25th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 47:1–47:10.

Wang, Z., Mesghouni, K., and Hammadi, S. (2014). Agent-based coalition formation in a co-modal transport system. In *Proceedings of the 2014 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT) - Volume 03*, pages 310–317.

Xi, J., Wang, Q., Ding, T., Zheng, L., Wang, S., and Li, W. (2015). Research on the coordinated design of bus and taxi station. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(372496):5.