

Computational Aspects of Carsharing Planning Without Relocation Operations

Autor: Cristiano Martins Monteiro

Orientador: Clodoveu Augusto Davis Jr.

Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais

Rua Reitor Píres Albuquerque, 2, Belo Horizonte - MG, Brasil, 31270-901

{cristianomartins, clodoveu}@dcc.ufmg.br

RESUMO

O carsharing pode ser atrativo mesmo para quem atualmente possui e dirige um carro, mas prefere um meio de transporte mais barato e sustentável. Esta tese de doutorado contextualiza os desafios operacionais e computacionais ao planejar um serviço de carsharing; prova a NP-Completeness de dois problemas relativos à localização de estações de mobilidade compartilhada; propõe uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (MILP) para o problema de localização exata e propõe outra formulação MILP para o problema de seleção de segmentos de rua; propõe três modelos de negócio de carsharing de baixo custo; e resolve uma formulação linear de tempo polinomial para simular e comparar o desempenho desses modelos de negócio usando dados históricos de mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo. Os resultados apresentam os padrões espaço-temporais das viagens, e mostram que é possível oferecer um serviço lucrativo de carsharing de baixo custo sem realizar realocações de veículos.

PALAVRAS CHAVE. Mobilidade de Baixo Custo, Programação Linear Inteira Mista, Simulação.

Tópicos: L&T - Logística e Transportes; OA – Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

A properly planned carsharing service can be attractive for people who currently own and drive a private vehicle, but would prefer using cheaper and more sustainable means of transport. This PhD thesis contextualizes the operational and computational challenges in planning a carsharing service; proves the NP-Completeness of two problems regarding the location of shared mobility stations; proposes a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) formulation for the exact location problem, and proposes another but faster MILP formulation for the street segments selection problem; proposes three different low-cost carsharing business models; and solves a polynomial-time linear formulation to simulate and compare the performance of the carsharing business models according with historical mobility data from the São Paulo Metropolitan Area. Results include the spatio-temporal patterns of the trips, and show that it is possible to offer a profitable low-cost carsharing service without performing vehicle relocations.

KEYWORDS. Low-cost Mobility, Mixed-Integer Linear Programming, Simulation.

Paper topics: L&T - Logistics and Transportation; OA - Other applications in OR.

1. Descrição dos subprodutos da tese

A tese resultou em oito subprodutos, dos quais sete já estão publicados como artigos em periódicos, conferências ou um capítulo de livro. As seções seguintes descrevem cada um dos subprodutos gerados. As métricas do Qualis de Ciência da Computação e porcentagens de maior percentil Scopus foram obtidas na página <https://ppgcc.github.io/discentesPPGCC/pt-BR/qualis/>. As porcentagens de maior percentil Scopus foram confirmadas na página <https://www.scopus.com/sources.uri>. O número de citações dos trabalhos foi obtido pelo Google Acadêmico.

Em resumo, os subprodutos da tese são:

- 2 publicações como primeiro autor em periódicos internacionais Qualis A1;
- 1 artigo como primeiro autor em segunda rodada de revisões na International Transactions in Operational Research, Qualis A1;
- 1 publicação como co-autor em periódico internacional Qualis A2;
- 1 publicação como primeiro autor em conferência internacional;
- 1 publicação como co-autor em conferência internacional;
- 1 publicação como primeiro autor em conferência nacional;
- 1 publicação como primeiro autor de capítulo de livro.

As contribuições da tese não se resumem somente à aplicação na área de transportes, mas também trazem resultados de complexidade de tempo de algoritmos e provas de NP-Completeness de problemas de otimização. Dessa forma, a tese faz impacto nas áreas de Pesquisa Operacional, Engenharia de Transportes e Ciência da Computação. Ao lidar com problemas dessas áreas, os resultados da tese também envolvem a avaliação de modelos de negócio para serviços de transporte compartilhado; e a adequação das soluções propostas a questões de sustentabilidade e impacto social do carsharing de baixo custo.

A interdisciplinaridade do doutorado também é destacada pela co-autoria de trabalhos publicados com pesquisadores da área de Engenharia de Transportes da USP. Essa interação possibilitou a validação dos métodos propostos às dinâmicas e desafios reais de serviços de transporte compartilhado em São Paulo. O amadurecimento da pesquisa é também evidenciado pela publicação de trabalhos em periódicos de impacto nos últimos anos do doutorado, apresentando análises baseadas em dados reais de mobilidade sobre toda a Região Metropolitana de São Paulo.

A tese de doutorado adere devidamente ao tema oficial “Integração da mobilidade urbana e sustentabilidade” do SBPO 2023 pelo foco em contextualizar e resolver desafios complexos de mobilidade urbana no Brasil através de métodos de Pesquisa Operacional. A otimização do compartilhamento de veículos evidenciou não somente a viabilidade econômica de diferentes modelos de negócio, como também esclareceu os nichos de demanda do carsharing como solução sustentável e barata de transporte particular. Dessa forma, o carsharing se integra à mobilidade urbana explorando os cenários em que aplicativos de corrida (como Uber e 99) não conseguem oferecer preços acessíveis, ou em momentos em que simplesmente não há um motorista disponível.

A tese de doutorado é diretamente útil para tomadores de decisão de empresas de carsharing ou de locação convencional de veículos, pelos seguintes resultados:

- redução de custos e complexidade do negócio ao evitar a relocação de veículos;

- lucratividade do negócio mesmo em cenários em que toda a frota de veículos é alugada;
- proposta de formulações de Otimização Linear Inteira Mista eficazes para o problema de localização das estações de carsharing;
- aplicação de uma formulação linear resolvível em tempo polinomial para as tarefas rotineiras de planejamento, gerenciamento de recursos e *matching* entre viagens de clientes;
- estimativa da demanda de clientes pelo serviço com base no preço de produtos concorrentes, no caso, a tarifa base da Uber;
- estimativa do limite de escalabilidade do serviço de carsharing dado a disponibilidade de espaços de estacionamento e flexibilidade dos clientes em caminhar;
- análise espacial e temporal da possível demanda do carsharing com base em dados reais de mobilidade de toda a Região Metropolitana de São Paulo.

A seção 2 descreve os artigos publicados em periódicos. A seção 3 descreve o artigo atualmente em segunda rodada de revisões na *International Transactions in Operational Research*. A seção 4 descreve os artigos publicados em conferências. Finalmente, a seção 5 descreve o capítulo de livro publicado. As páginas após a seção 5 listam os trabalhos publicados.

2. Publicações em periódicos

Esta seção apresenta os subprodutos da tese que foram publicados em periódicos internacionais. A subseção a seguir descreve as publicações como primeiro autor.

2.1. Primeiro autor em periódicos internacionais

Dentre os subprodutos da tese, dois artigos foram publicados como primeiro autor em periódicos internacionais com Qualis A1. Estes artigos foram:

Qualis A1

Monteiro, C. M. & Davis, C. A. (2023). Polynomial-Time Carsharing Optimization: Linear Formulation and Large-Scale Simulations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 4428–4437. doi:10.1109/TITS.2022.3232149

Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Lage, M. d. O., Berssaneti, F. T., Davis Jr., C. A. & Quintanilha, J. A. (2021). Optimization of carsharing fleet size to maximize the number of clients served. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101623. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2021.101623

Essas publicações estão descritas respectivamente nas subseções a seguir.

2.1.1. Polynomial-Time Carsharing Optimization – IEEE T-ITS (2023)

O periódico *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* possui maior percentil Scopus de 97%. O artigo propõe uma formulação de otimização linear resolvível em tempo polinomial para o dimensionamento de frota segundo três modelos de negócios, também propostos no artigo, para carsharing de baixo custo. Essa formulação foi aplicada a dados reais de mobilidade urbana de toda a Região Metropolitana de São Paulo. Os resultados mostraram a viabilidade econômica dos modelos de negócio, e evidenciaram padrões espaciais e temporais da demanda de mobilidade a ser atendida pelo serviço de carsharing.

2.1.2. Optimization of carsharing fleet size – CEUS (2021)

O periódico *Computers, Environment and Urban Systems* possui maior percentil Scopus de 98%. O artigo publicado possui 16 citações. O trabalho descreve os desafios operacionais e de performance computacional para o planejamento do carsharing one-way. Neste modelo, o serviço de carsharing permite ao cliente devolver o carro alugado em uma estação diferente da estação de retirada.

Uma formulação de otimização linear inteira mista é proposta e diferentes conjuntos regras do carsharing foram aplicadas para avaliar a escalabilidade do serviço e performance computacional das simulações realizadas. Os resultados mostraram o impacto que a distância caminhada pelos clientes tem para a eficiência do serviço, e foi evidenciado que é melhor ter menos estações de carsharing mas com várias vagas de estacionamento, do que várias estações mas com poucas vagas de estacionamento cada.

A subseção a seguir apresenta o artigo publicado como co-autor em periódico internacional.

2.2. Co-autor em periódico internacional

Dentre os subprodutos da tese, um artigo foi publicado como co-autor em periódico internacional. Este artigo foi:

Qualis A2 – Sustainability (2021)

Lage, M. d. O., Machado, C. A. S., Monteiro, C. M., Davis Jr., C. A., Yamamura, C. L. K., Bersaneti, F. T. & Quintanilha, J. A. (2021). Using Hierarchical Facility Location, Single Facility Approach, and GIS in Carsharing Services. *Sustainability*, 13(22), 12704. doi:10.3390/su132212704

O periódico *Sustainability* possui maior percentil Scopus de 86%. Apesar de na avaliação atual o Qualis do periódico ser enquadrado como A2, o periódico está muito próximo do limiar de 87,5% para atualmente ser enquadrado como Qualis A1. O artigo já possui 5 citações. O trabalho aplica e compara técnicas de análise espacial para a alocação eficiente de estações de carsharing em São Paulo. Um subconjunto de estações de carsharing é selecionado como melhores opções para o serviço de carsharing após maximizar a cobertura e satisfação dos possíveis clientes, enquanto minimiza custos operacionais. Dessa forma, o serviço cumpre o seu dever de sustentabilidade ao facilitar o compartilhamento dos veículos.

A seção a seguir apresenta o artigo submetido a um periódico internacional Qualis A1.

3. Qualis A1: artigo como primeiro-autor submetido a periódico internacional

Dentre os subprodutos da tese também há um artigo como primeiro-autor submetido ao periódico *International Transactions in Operational Research*, que atualmente é Qualis A1. A expectativa é que o artigo seja publicado nos próximos meses, dado que a submissão já está na segunda rodada de revisões.

Os resultados do artigo são:

- prova de teorema de que otimizar a localização exata de estações para serviços de mobilidade compartilhada é um problema NP-Completo;
- prova de teorema de que selecionar segmentos de rua para ter estações para serviços de mobilidade compartilhada também é um problema NP-Completo;
- proposta de formulações de otimização linear inteira mista para cada um dos dois problemas;

- proposta de duas heurísticas para a resolução desses problemas;
- aplicação da heurística e dessas formulações na rede de circulação viária de toda a Região Metropolitana de São Paulo;
- comparação da performance da heurística e de ambas as formulações.

Resultados também mostraram que a precisão obtida ao otimizar a localização exata das estações compensa o tempo e esforço adicional aplicado ao resolver esse problema de otimização. A seção a seguir apresenta os trabalhos publicados em conferências.

4. Publicações em conferências

Esta seção apresenta os subprodutos da tese que foram publicados em conferências. Essas publicações foram importantes para validar resultados preliminares da otimização de carsharing, indicando que o foco em oferecer um serviço de carsharing lucrativo e de baixo custo é um tema de pesquisa promissor. A subseção a seguir descreve as publicações como primeiro autor.

4.1. Primeiro autor em conferências

Dentre os subprodutos da tese, dois artigos foram publicados como primeiro autor em conferências: uma internacional e uma nacional. Esses artigos estão listados abaixo e são descritos nas subseções a seguir:

Conferência Internacional e Nacional

Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Lage, M. d. O., Berssaneti, F. T., Davis Jr., C. A. & Quintanilha, J. A. (2019). Maximizing Carsharing Profits: An Optimization Model to Support the Carsharing Planning. Em *25th International Conference on Production Research 2019 (ICPR 2019)* (Vol. 39, pp. 1968–1976). Chicago, USA: Elsevier.

Monteiro, C. M., Mateus, G. R. & Davis Jr., C. A. (2019). Computational Performance of Carsharing Fleet-Sizing Optimization. Em *XVIII Brazilian Symposium on GeoInformatics (GEOINFO)* (pp. 111–122).

As subseções a seguir descrevem estes artigos.

4.1.1. Maximizing Carsharing Profits – International Conference on Production Research (2019)

A *International Conference on Production Research* é uma conferência tradicional da área de produção. O artigo foi publicado na 25ª edição da conferência, que ocorreu em Chicago, USA. Esse artigo já possui 10 citações.

O trabalho apresenta uma formulação de otimização linear inteira mista rápida de ser resolvida computacionalmente para o dimensionamento da frota de veículos de carsharing. Essa formulação visa a maximização do lucro da empresa. Os resultados mostraram que, no geral, a duração dos alugueis de carsharing tem maior impacto no lucro da empresa do que outros fatores que também influenciam o preço do aluguel, como a distância percorrida. Esse padrão identificado é útil para a previsão da viabilidade econômica do serviço.

4.1.2. Computational Performance of Carsharing Fleet-Sizing – GEOINFO (2019)

O *Brazilian Symposium on GeoInformatics (GEOINFO)* é uma conferência tradicional da área de geoinformática e atualmente possui Qualis B1. O artigo foi publicado na 18ª edição da conferência.

O artigo comparou a performance computacional de duas formulações de otimização linear inteira mista para o dimensionamento da frota de carsharing em São Paulo. Os resultados do

artigo trouxeram o insight de que é possível oferecer um serviço de carsharing de baixo custo, que seja lucrativo e que funcione em larga-escala. Porém, o planejamento deste serviço depende de formulações de otimização computacionalmente eficientes.

A subseção a seguir apresenta a publicação como co-autor em conferência internacional.

4.2. Co-autor em conferência internacional

Dentre os subprodutos da tese, um outro artigo foi publicado como co-autor na mesma conferência internacional:

International Conference on Production Research (2019)

Lage, M. d. O., Machado, C. A. S., Monteiro, C. M., Berssaneti, F. T. & Quintanilha, J. A. (2019). Location Suitable for the Implementation of Carsharing in the City of São Paulo. Em *25th International Conference on Production Research 2019 (ICPR 2019)* (Vol. 39, pp. 1962–1967). Chicago, USA: Elsevier.

Esse artigo já possui 6 citações. O trabalho consistiu em aplicar um modelo Location-Allocation para sugerir a localização de estações de carsharing em São Paulo. O modelo considerou o número de funcionários em diferentes estabelecimentos econômicos a fim de estimar estabelecimentos parceiros para o serviço de carsharing. As localizações das estações geradas foram utilizadas como entrada de dados para a publicação descrita na subseção 4.1.1.

A seção a seguir descreve o capítulo de livro publicado como primeiro autor.

5. Capítulo de livro internacional

A tese também teve como subproduto um capítulo de livro internacional publicado como primeiro autor. Este capítulo de livro foi:

International Encyclopedia of Transportation – Elsevier (2021)

Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Nardocci, A. C., Berssaneti, F. T., Quintanilha, J. A. & Jr., C. A. D. (2021). Shared Mobility Opportunities and Their Computational Challenges for Improving Health-Related Quality of Life. Em R. Vickerman (Ed.), *International Encyclopedia of Transportation* (pp. 376–383). Oxford: Elsevier.

O capítulo de livro abordou o impacto que os meios de transporte compartilhados tem na saúde das pessoas. O trabalho apresentou:

- uma revisão da literatura sobre doenças causadas por poluição aérea e sonora de modos de transporte ineficientes;
- a importância e impacto de serviços de mobilidade inclusivos, confiáveis e de baixo custo;
- e a complexidade computacional existente em resolver tais problemas de transporte em larga-escala e em tempo factível.

Os sete trabalhos já publicados estão listados nas referências a seguir. Com a publicação do trabalho submetido ao *International Transactions in Operational Research*, a tese de doutorado terá resultado em 8 publicações, sendo 3 como primeiro autor em periódicos Qualis A1.

Referências

- Lage, M. d. O., Machado, C. A. S., Monteiro, C. M., Berssaneti, F. T. & Quintanilha, J. A. (2019). Location Suitable for the Implementation of Carsharing in the City of São Paulo. Em *25th International Conference on Production Research 2019 (ICPR 2019)* (Vol. 39, pp. 1962–1967). Chicago, USA: Elsevier.
- Lage, M. d. O., Machado, C. A. S., Monteiro, C. M., Davis Jr., C. A., Yamamura, C. L. K., Berssaneti, F. T. & Quintanilha, J. A. (2021). Using Hierarchical Facility Location, Single Facility Approach, and GIS in Carsharing Services. *Sustainability*, 13(22), 12704. doi:10.3390/su132212704
- Monteiro, C. M. & Davis, C. A. (2023). Polynomial-Time Carsharing Optimization: Linear Formulation and Large-Scale Simulations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 4428–4437. doi:10.1109/TITS.2022.3232149
- Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Lage, M. d. O., Berssaneti, F. T., Davis Jr., C. A. & Quintanilha, J. A. (2019). Maximizing Carsharing Profits: An Optimization Model to Support the Carsharing Planning. Em *25th International Conference on Production Research 2019 (ICPR 2019)* (Vol. 39, pp. 1968–1976). Chicago, USA: Elsevier.
- Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Lage, M. d. O., Berssaneti, F. T., Davis Jr., C. A. & Quintanilha, J. A. (2021). Optimization of carsharing fleet size to maximize the number of clients served. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101623. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2021.101623
- Monteiro, C. M., Machado, C. A. S., Nardocci, A. C., Berssaneti, F. T., Quintanilha, J. A. & Jr., C. A. D. (2021). Shared Mobility Opportunities and Their Computational Challenges for Improving Health-Related Quality of Life. Em R. Vickerman (Ed.), *International Encyclopedia of Transportation* (pp. 376–383). Oxford: Elsevier.
- Monteiro, C. M., Mateus, G. R. & Davis Jr., C. A. (2019). Computational Performance of Carsharing Fleet-Sizing Optimization. Em *XVIII Brazilian Symposium on GeoInformatics (GEOINFO)* (pp. 111–122).