

Contribuições na logística de entrega urbana expressa de última milha usando grandes instâncias reais de cidades brasileiras

Thailsson Clementino¹, Rosiane de Freitas¹, Eduardo Uchoa²

Instituto de Computação - Universidade Federal do Amazonas¹

Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense²

III Workshop Brasileiro de Cidades Inteligentes

3 de Agosto, 2022
Niterói/RJ - Brasil



Empoderamento Digital:
O Papel da Computação na Construção
de uma Sociedade Inclusiva e Democrática

Conteúdo

- 1** Entregas Expressas de Última milha
- 2** Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo
- 3** Método de Resolução
 - VRPSolver
 - Modelagem Matemática
- 4** Resultados
 - Instâncias Adaptadas
 - Experimentos Computacionais
- 5** Considerações Finais

Entregas Expressas de Última milha

Introdução

- A demanda por serviços de entrega é gigante.

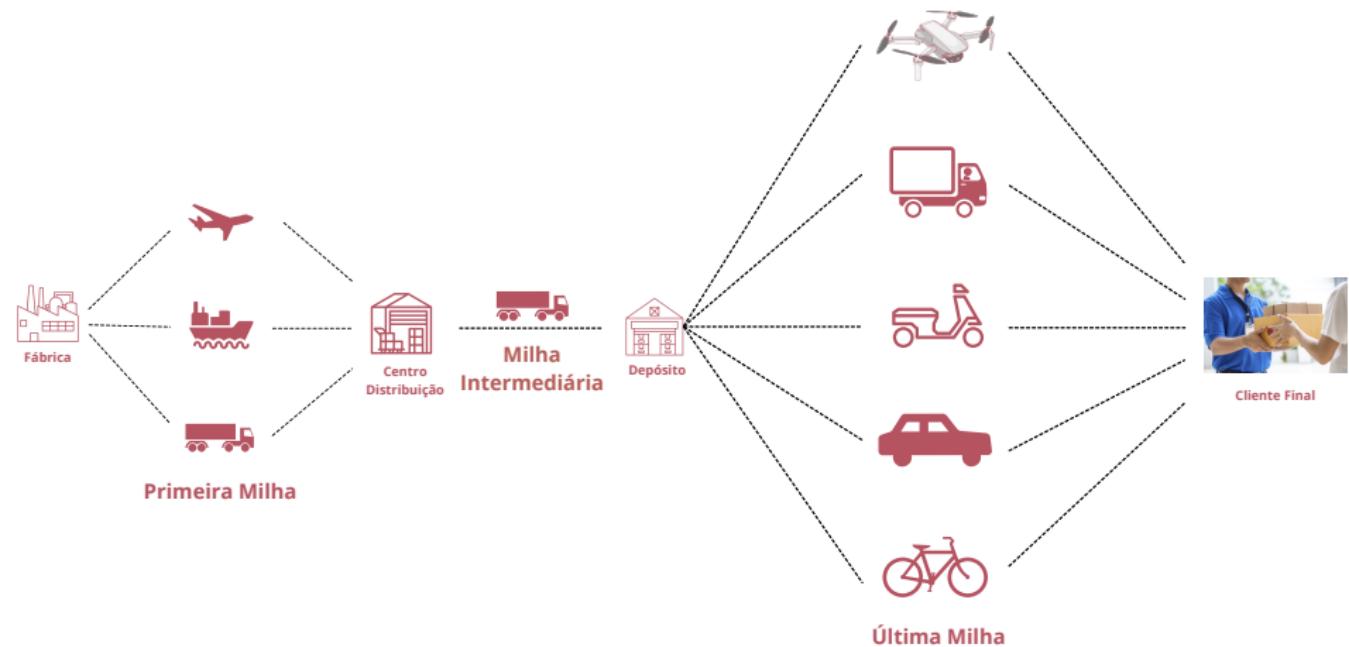
Introdução

- A **demand**a por serviços de entrega é gigante.
- Entregas expressas no **mesmo dia** (ou no dia seguinte) se tornaram mais importantes.

Introdução

- A **demand**a por serviços de entrega é gigante.
- Entregas expressas no **mesmo dia** (ou no dia seguinte) se tornaram mais importantes.
- Garantir que cada passo da cadeia logística de entregas funcione bem é um grande **desafio**.

Entregas de Última milha



O Problema do Roteamento de Veículos

O problema de criar rotas de última milha com o menor custo associado possível é conhecido na literatura como o Problema de Roteamento de Veículos (do inglês, **Vehicle Routing Problem - VRP**).

Esse problema e suas variações tem sido objeto de intensa investigação nos campos da otimização combinatória e da pesquisa operacional desde os anos 50.¹²

¹ George B Dantzig and John H Ramser. "The truck dispatching problem". In: *Management science* 6.1 (1959), pp. 80–91.

² Paolo Toth and Daniele Vigo. *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM, 2014.

Importância do VRP

Resolver o problema de roteamento de maneira **eficiente** implica em contribuir diretamente para o desenvolvimento de **cidades inteligentes**.

O problema pode ser aplicado em vários cenários como:

- entrega de compras online;
- coletas de lixo;
- entregas postais;
- roteamento de ônibus escolares, etc.



Importância do VRP

Resolver o problema de roteamento de maneira **eficiente** implica em contribuir diretamente para o desenvolvimento de **cidades inteligentes**.

O problema pode ser aplicado em vários cenários como:

- entrega de compras online;
- coletas de lixo;
- entregas postais;
- roteamento de ônibus escolares, etc.

Além de tudo, economiza dinheiro!



Variações do VRP

Com o passar dos anos, **características e restrições** foram incorporados ao problema de roteamento para tentar replicar problemas reais:

- **capacidade** de armazenamento dos veículos;
- integração de mais de um **depósito** como fonte de fornecimento dos produtos;
- **tempo** em que as rotas podem ser executadas;
- algumas variações ainda tratam a entrada do problema de maneira **dinâmica**.

Variações do VRP

Uma restrição a ser destacada em alguns tipos de entregas feitas no mesmo dia é a **disponibilidade do cliente para o recebimento**, no qual não se pode realizar uma entrega fora da janela de tempo na qual o cliente esteja disponível.

Essa restrição adicionada ao clássico VRP compõe a variante mais famosa na literatura de roteamento de veículos, o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (em inglês, **Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW**)

Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo

O Problema - VRPTW

Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW³

Dado um grafo direcionado completo $G = (V, A)$, onde o conjunto de vértices V é composto pelo vértice 0, que representa o depósito, mais um conjunto de vértices $N = \{1, \dots, |N|\}$, que representa os clientes que serão visitados. A é o conjunto de arestas que liga cada par $(i, j) \in V \times V$, onde $i \neq j$.

³Roberto Baldacci, Aristide Mingozzi, and Roberto Roberti. "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints". In: *European Journal of Operational Research* 218.1 (2012), pp. 1–6.

O Problema - VRPTW

Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW³

Dado um grafo direcionado completo $G = (V, A)$, onde o conjunto de vértices V é composto pelo vértice 0, que representa o depósito, mais um conjunto de vértices $N = \{1, \dots, |N|\}$, que representa os clientes que serão visitados. A é o conjunto de arestas que liga cada par $(i, j) \in V \times V$, onde $i \neq j$.

- Associado a cada aresta existe um custo de viagem c_{ij} e um tempo de viagem $t_{ij} > 0$, onde t_{ij} inclui o tempo de serviço no vértice i .

³Roberto Baldacci, Aristide Mingozzi, and Roberto Roberti. "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints". In: *European Journal of Operational Research* 218.1 (2012), pp. 1–6.

O Problema - VRPTW

Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW³

Dado um grafo direcionado completo $G = (V, A)$, onde o conjunto de vértices V é composto pelo vértice 0, que representa o depósito, mais um conjunto de vértices $N = \{1, \dots, |N|\}$, que representa os clientes que serão visitados. A é o conjunto de arestas que liga cada par $(i, j) \in V \times V$, onde $i \neq j$.

- Associado a cada aresta existe um custo de viagem c_{ij} e um tempo de viagem $t_{ij} > 0$, onde t_{ij} inclui o tempo de serviço no vértice i .
- Em cada vértice $i \in V$ é associado:
 - uma demanda q_i ;
 - e uma janela de tempo $[e_i, d_i]$, onde e_i e d_i representam respectivamente o primeiro e o último momento onde é possível visitar o vértice i .

³Roberto Baldacci, Aristide Mingozzi, and Roberto Roberti. "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints". In: *European Journal of Operational Research* 218.1 (2012), pp. 1–6.

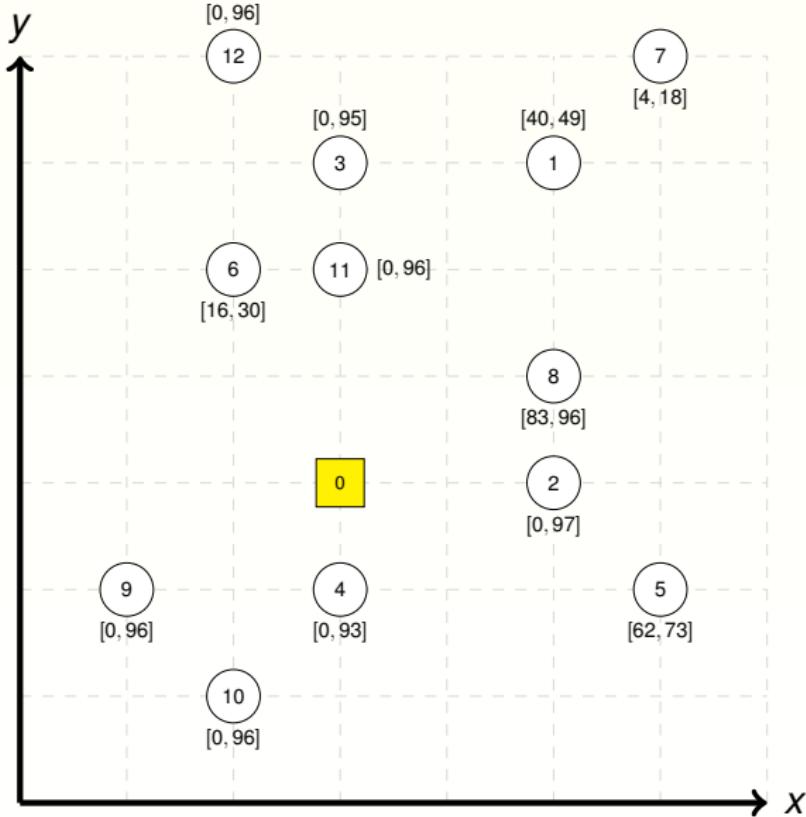
O Problema - VRPTW

Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW

Para realizar as entregas são disponibilizados um frota de denotado por $K = \{1, \dots, |K|\}$. Os veículos são homogêneos e possuem capacidade Q .

O objetivo é minimizar o custo total das rotas tais que essas rotas obegeçam as restrições de **capacidade e das janelas de tempo**.

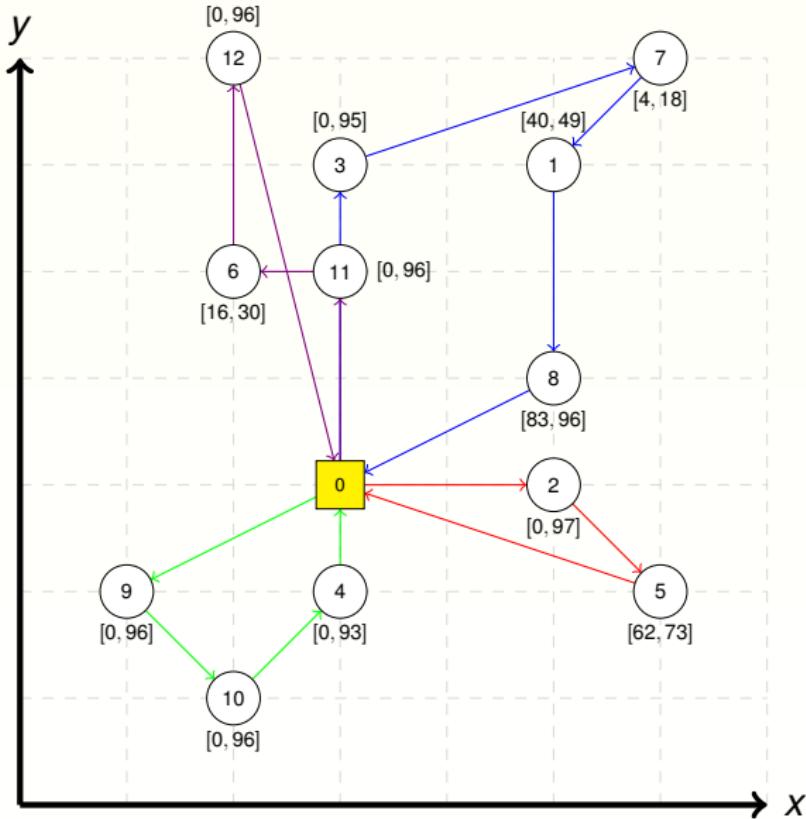
VRPTW - Instância



Capacidade Q = 70

i	q_i	s_i
1	16	10
2	19	10
3	23	10
4	9	10
5	2	10
6	19	10
7	20	10
8	6	10
9	41	10
10	10	10
11	23	10
12	14	10

VRPTW - Instância



Rota 4

#	tempo
0	0.0
11	2.0
6	16.0
12	28.0
0	42.1

Método de Resolução

Método de Resolução

A ideia do trabalho foi utilizar:

- Utilizar uma **abordagem exata**;
- Implementar em um **solver** com o objetivo de entender o funcionamento e colaborar com a solução de **instâncias** grandes e baseadas em **entregas reais**.

Por isso, neste trabalho foi utilizado um framework proposto para construção de modelos robustos, o **VRPSolver**⁴.

⁴Artur Pessoa et al. “A generic exact solver for vehicle routing and related problems”. In: *Mathematical Programming* 183.1 (2020), pp. 483–523.

VRPSolver

A ideia do solver (VRPSolver) é definir um **modelo genérico** tal que, nas ocasiões em que se consegue encaixar um problema de otimização nesse modelo genérico ele pode ser resolvido por um algoritmo **Branch-Cut-and-Price**.

VRPSolver

A ideia do solver (VRPSolver) é definir um **modelo genérico** tal que, nas ocasiões em que se consegue encaixar um problema de otimização nesse modelo genérico ele pode ser resolvido por um algoritmo **Branch-Cut-and-Price**.

No modelo, todos os subproblemas são modelados como um **problema de caminho mínimo com restrição de recurso**. Para desenvolver uma modelagem no VRPSolver devem ser definido:

- **grafos com recursos** associados as arestas (ou aos vértices);
- a **formulação mestre** em programação linear inteira (ILP) contendo a função objetivo;
- uma **função de mapeamento** que mapeia as variáveis de decisão aos grafos.

Grafo com Recursos

$G = (V, A)$, $v_{source} = v_{sink} = 0$;

$R = R_M = \{1, 2\}$;

$q_{a,1} = q_j, a \in A$;

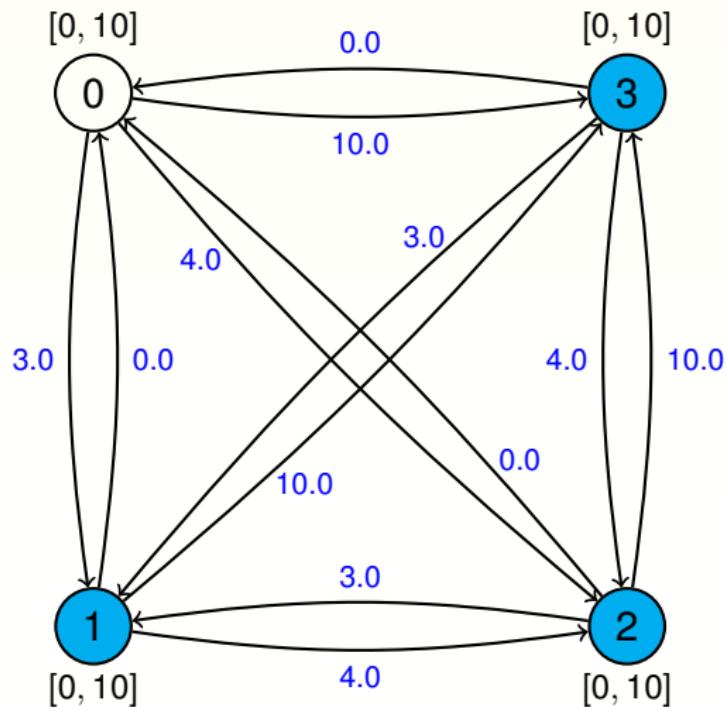
$q_{a,2} = t_{ij}, a \in A$;

$[l_{i,1}, u_{i,1}] = [0, Q], i \in V$;

$[l_{i,2}, u_{i,2}] = [e_i, d_i], i \in V$;

Grafo com Recursos - Exemplo

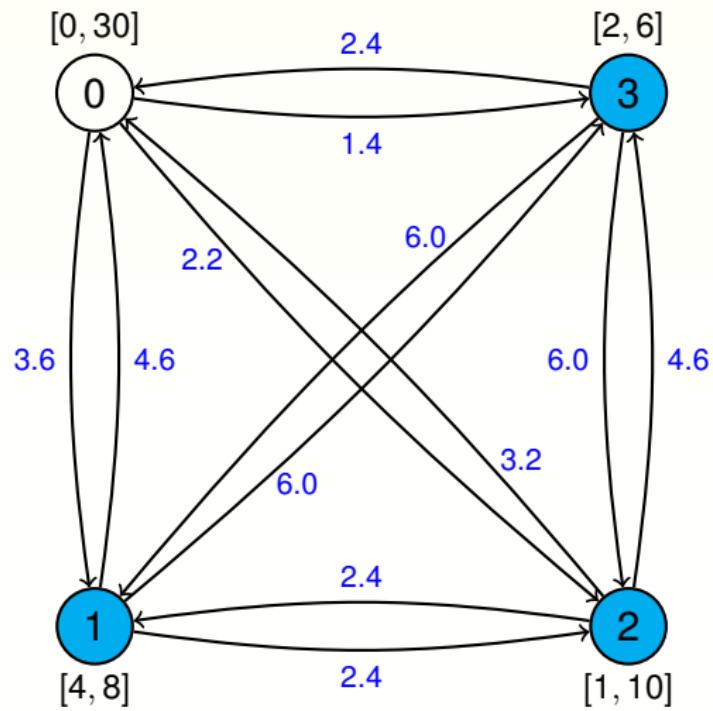
Recurso 1 - Capacidade $Q = 10$



i	q_i	e_i	d_i	s_i
0	0	0	30	0
1	3	4	8	1
2	4	1	10	1
3	10	2	6	1

Grafo com Recursos - Exemplo

Recurso 2 - Tempo



i	q_i	e_i	d_i	s_i
0	0	0	30	0
1	3	4	8	1
2	4	1	10	1
3	10	2	6	1

Formulação - ILP

- Variável:

- $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a aresta } (i,j) \text{ for utilizada na solução,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Formulação - ILP

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}$$

Subject to:

$$\boxed{1} \quad \sum_{(i,j) \in \delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N$$

$$\boxed{2} \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A$$

Formulação - ILP

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}$$

Subject to:

$$1 \quad \sum_{(i,j) \in \delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N$$

Cada cliente é atendido exatamente uma vez.

$$2 \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A$$

Formulação - ILP

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}$$

Subject to:

$$1 \quad \sum_{(i,j) \in \delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N$$

Cada cliente é atendido exatamente uma vez.

$$2 \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A$$

Restrição de Integralidade

Função de Mapeamento

Função de mapeamento

$M(x_{ij}) = \{(i, j)\}, \forall (i, j) \in A;$

Limites de rotas

$L = 1, U = |K|.$

Resultados

Resultados

O modelo elaborado no VRPSolver foi testado em dois conjuntos de instâncias:

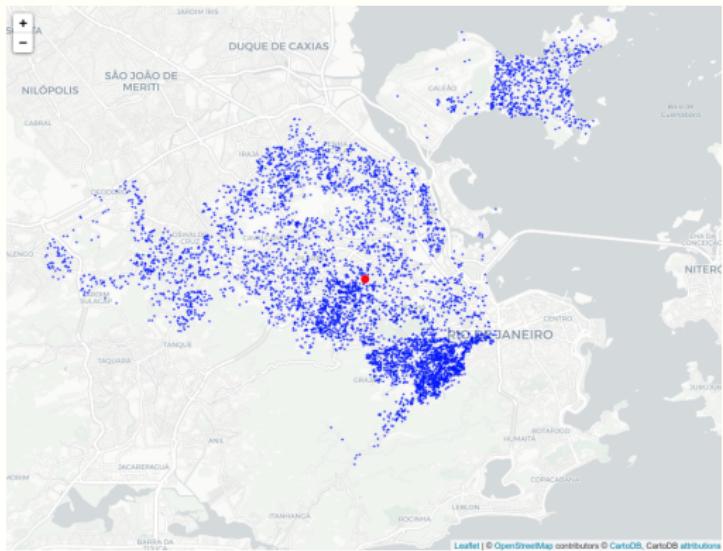
- Clássicas instâncias de Solomon⁵;
- instâncias adaptadas a partir do *benchmark* de entregas urbanas expressas (loggiBUD) proposto pela empresa Loggi⁶;

⁵ Marius M Solomon. "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints". In: *Operations research* 35.2 (1987), pp. 254–265.

⁶ Loggi. *loggiBUD: Loggi Benchmark for Urban Deliveries*. 2021.

Benchmark loggibud

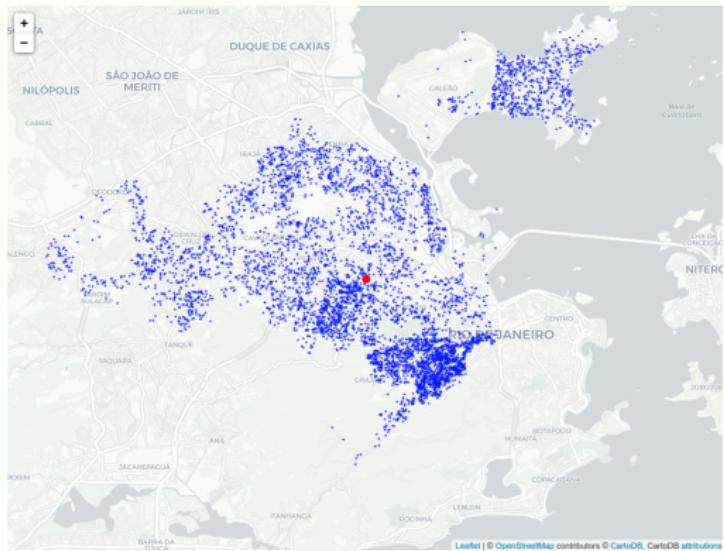
- criadas sinteticamente com dados públicos;
- simula um desafio real de uma grande empresa.



Benchmark loggibud

Cidades disponíveis no benchmark pertencem aos estados:

- Pará - PA
- Rio de Janeiro - RJ
- Distrito Federal - DF

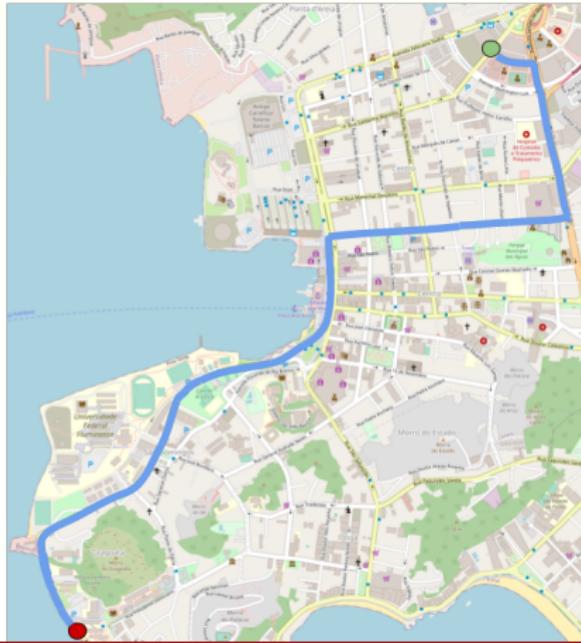


Benchmark loggibud

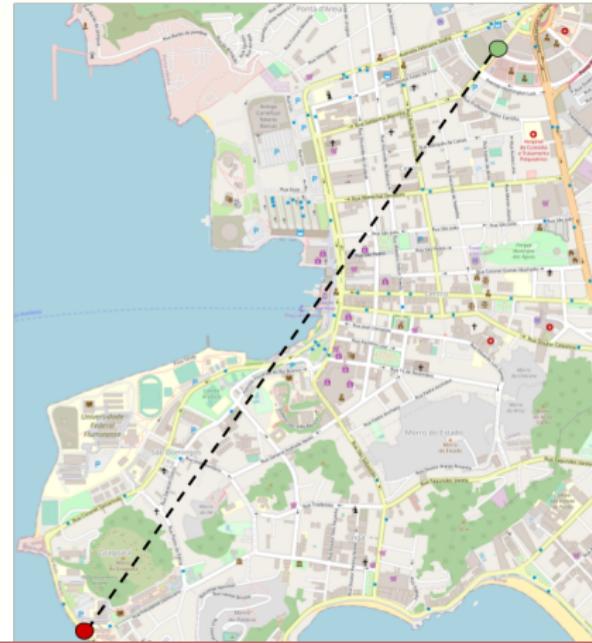
O custo de deslocamento c_{ij} entre dois clientes i e j (ou depósito) é calculado através de distâncias de mapas utilizando ruas reais.



OPEN SOURCE ROUTING MACHINE



Thailsson Clementino (ICOMP/UFAM)



VRPTW em instâncias reais de cidades brasileiras

Instâncias adaptadas

- O loggiBUD possui 1320 instâncias para o CVRP, dessas foram selecionadas algumas instâncias representativas para adicionar janelas de tempo.

Instâncias adaptadas

- Quatro diferentes tipos de intervalos foram utilizados:
 - R - Instâncias com Janelas de Tempo aleatórias;
 - F30m - Instâncias com Janelas de Tempo fixas de 30 min;
 - F1h - Instâncias com Janelas de Tempo fixas de 1h;
 - F2h - Instâncias com Janelas de Tempo fixas de 2h;
- No total, 60 instâncias novas foram geradas, sendo 15 para cada tipo de intervalo;

Instâncias disponíveis em: [Link](#)

Experimentos Computacionais

■ Setup

- 16Gb de memória disponível;
- Intel Core i7-8750H 2.20GHz
- Linux Ubuntu 20.04.4

■ Implementação

- Disponível no site do VRPSolver

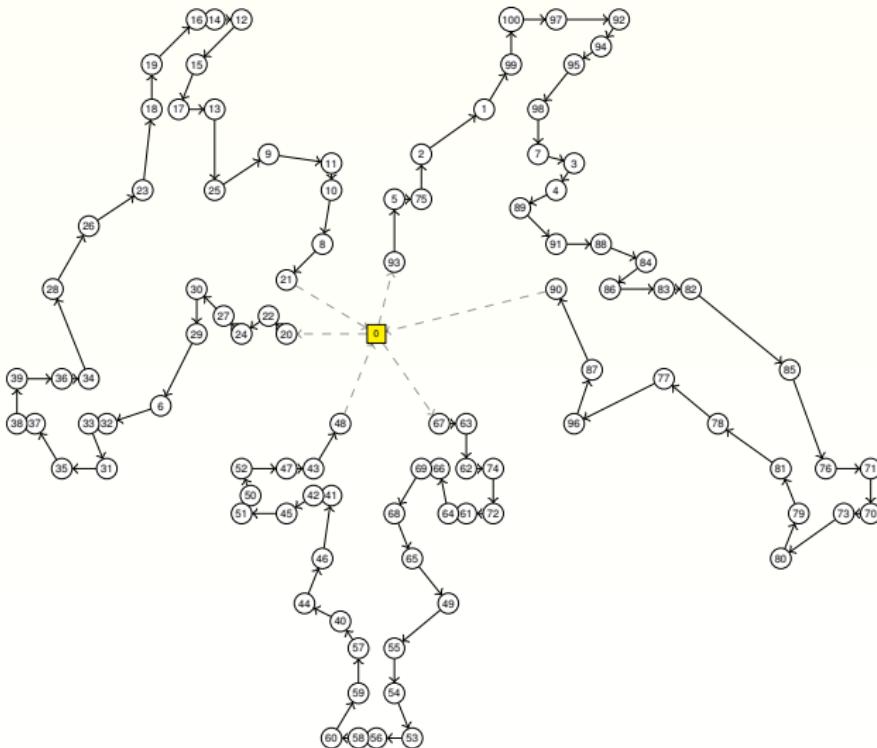
<https://vrpsolver.math.u-bordeaux.fr>

■ Cada instância foi executada 3 vezes com tempo limite de execução de 1.5h (5400s)

Instâncias de Solomon

Instância	Tempo (s)	Custo
C203	20.78	588.7
C204	46.61	588.1
R202	184.30	1029.6
R203	93.84	870.8
R204	470.02	731.3
R206	527.43	875.9
R207	305.83	794.0
R208	> 5400	
R209	549.01	854.8
R210	897.46	900.5
R211	656.16	746.7
RC204	339.39	783.5
RC207	217.88	962.9
RC208	344.38	776.09

Solução - C204



Instâncias Adaptadas loggiBUD

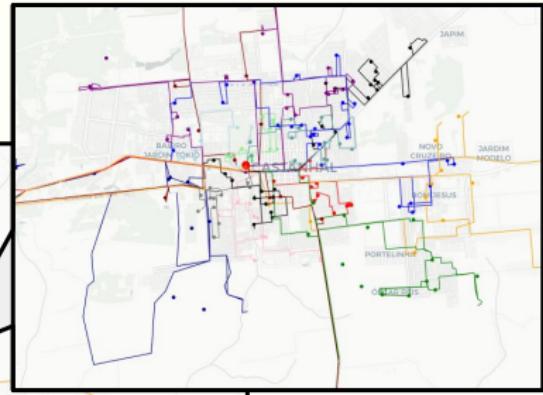
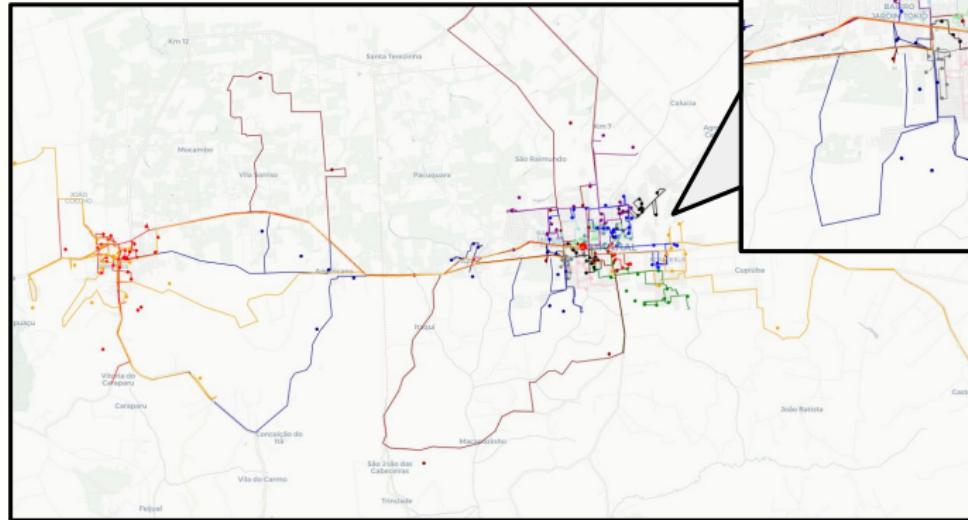
Instâncias com janelas fixas em 30 minutos.

Instância	Tempo (s)	Custo
F30m-pa-n289	1288.17	808037.0
F30m-pa-n266	273.04	895959.0
F30m-pa-n354	> 5400	
F30m-pa-n324	3081.95	875398.0
F30m-pa-n308	>5400	
F30m-df-n999	>5400	
F30m-df-n904	> 5400	
F30m-df-n974	> 5400	
F30m-df-n835	> 5400	
F30m-df-n939	> 5400	

Instâncias com janelas fixas em 1 hora.

Instância	Tempo (s)	Custo
F1h-pa-n269	486.05	880795.0
F1h-pa-n324	3474.46	1143354.0
F1h-pa-n322	> 5400	
F1h-pa-n212	958.37	645609.0
F1h-pa-n296	778.30	607808.0
F1h-df-n780	> 5400	
F1h-df-n815	> 5400	
F1h-df-n890	> 5400	
F1h-df-n957	> 5400	
F1h-df-n993	> 5400	

Instâncias Adaptadas logiBUD



Considerações Finais

Considerações Finais

- Foram adaptadas instâncias de cidades reais brasileiras do *benchmark loggiBUD*, para incorporar diferentes intervalos representando janelas de tempo para a variação VRPTW .

Considerações Finais

- Foram adaptadas instâncias de cidades reais brasileiras do *benchmark loggiBUD*, para incorporar diferentes intervalos representando janelas de tempo para a variação VRPTW .
- Um método de Branch-Cut-and-Price foi aplicado utilizando o VRPsolver, sendo validado de modo a se reproduzir resultados obtidos na literatura para um caso similar usando as instâncias de Solomon, e também, incorporando resultados representativos envolvendo grandes instâncias urbanas reais de até 300 clientes.

References

-  Baldacci, Roberto, Aristide Mingozzi, and Roberto Roberti. "Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints". In: *European Journal of Operational Research* 218.1 (2012), pp. 1–6.
-  Dantzig, George B and John H Ramser. "The truck dispatching problem". In: *Management science* 6.1 (1959), pp. 80–91.
-  Loggi. *loggiBUD: Loggi Benchmark for Urban Deliveries*. 2021.
-  Pessoa, Artur et al. "A generic exact solver for vehicle routing and related problems". In: *Mathematical Programming* 183.1 (2020), pp. 483–523.
-  Solomon, Marius M. "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints". In: *Operations research* 35.2 (1987), pp. 254–265.
-  Toth, Paolo and Daniele Vigo. *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM, 2014.

Obrigado!

Thailsson Clementino

thailsson.clementino@icomp.ufam.edu.br



UFAM

