UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO AUGUSTO DOS SANTOS BALERONI

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA COLETA SELETIVA NO SETOR CENTRAL DE TOLEDO-PR: UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM O ALGORITMO A* PARA MINIMIZAÇÃO EFICIENTE

TOLEDO

2023

PEDRO AUGUSTO DOS SANTOS BALERONI

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA COLETA SELETIVA NO SETOR CENTRAL DE TOLEDO-PR: UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM O ALGORITMO A* PARA MINIMIZAÇÃO EFICIENTE

ROUTE OPTIMIZATION FOR SELECTIVE WASTE COLLECTION IN THE CENTRAL SECTOR OF TOLEDO-PR: A DETERMINISTIC APPROACH USING THE A* ALGORITHM FOR EFFICIENT MINIMIZATION

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Cavalcanti Jeronymo

TOLEDO

2023

4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PEDRO AUGUSTO DOS SANTOS BALERONI

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS PARA COLETA SELETIVA NO SETOR CENTRAL DE TOLEDO-PR: UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM O ALGORITMO A* PARA MINIMIZAÇÃO EFICIENTE

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 19/dezembro/2023

Prof. Dr. Daniel Cavalcanti Jeronymo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Álvaro Ricieri Castro e Souza
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Gustavo Henrique Paetzold
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO

2023

Dedico este trabalho a todos que contribuíram de maneira significativa para o meu desenvolvimento, dedicando tempo, esforço e conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados progenitores, Renato e Nice, expresso minha profunda gratidão. Mesmo diante de suas reservas, eles não apenas me incentivaram a concluir este projeto, mas também suportaram meus surtos, incertezas e atrasos com paciência e compreensão.

À minha querida irmã Renata, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e mantendo-me com os pés no chão e a mente equilibrada.

Ao meu primo Nivaldo Henrique, que sempre me da apoio e é meu exemplo do que seguir, me incentivando a me desafiar cada dia mais em busca do meu melhor.

Aos amigos incríveis que deixaram uma marca indelével em minha jornada acadêmica, Renan, Auler e Johnny, cuja presença e perspectivas moldaram parte do meu caráter. Não posso deixar de mencionar meus queridos amigos Yuri, Bruno, Daniele, Amanda, Arthur e Gustavo. Aos companheiros de jornada, Matheus Pabis, Maria, Iago, Ronaldo e Matheus Lago, que compartilharam comigo o peso da graduação. A presença de todos vocês tornou essa jornada mais leve e significativa, e isso permanecerá eternamente em meu coração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Cavalcanti Jeronymo, expresso minha sincera gratidão. Sem sua orientação e paciência, este momento não teria se concretizado. Agradeço por seu grande esforço nos momentos mais desafiadores da graduação.

À minha terapeuta, Jaqueline Moretto, agradeço por ouvir minhas preocupações mais profundas, por reunir os pedaços quebrados e por acalmar meu desespero ao longo do processo de produção deste documento.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, minha sincera gratidão por permitir que eu vivesse o projeto mais emocionante, único e desafiador da minha vida. Agradeço a todos os docentes e servidores que desempenharam um papel fundamental em minha jornada acadêmica, ajudando-me a superar esta fase da vida com sucesso.

E aos demais que não tive a oportunidade de agradecer individualmente, mas que tiveram impacto e presença ao longo desta jornada, expresso meu reconhecimento sincero. Vocês também contribuíram para tornar esta experiência inesquecível.

São as perguntas que não sabemos responder que mais nos ensinam. Elas nos ensinam a pensar. Se você dá uma resposta a um homem, tudo o que ele ganha é um fato qualquer. Mas, se você lhe der uma pergunta, ele procurará suas próprias respostas. (ROTHFUSS, Patrick).

RESUMO

As cidades inteligentes são um novo conceito de cidade que surgiu para lidar com o aumento da população urbana e a necessidade de planejamento urbano. Elas podem ser definidas pelo uso de tecnologias e dados para melhorar a qualidade de vida de seus habitantes. A coleta seletiva de lixo é uma prática importante para a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade das cidades. O uso de algoritmos de roteamento para planejar rotas eficientes para a coleta de lixo pode ajudar a reduzir o congestionamento do tráfego, minimizar o tempo de coleta e reduzir os custos de combustível. Neste trabalho é proposta a aplicação do algoritmo *A** ao problema de coleta seletiva de lixo na cidade de Toledo-PR. Mediante levantamento de dados *in loco* foram mapeados 84 pontos de coleta seletiva na região central do município. O grafo da região central, obtido através do projeto público OpenStreetMap, foi utilizado para resolver o problema de caminho mínimo entre os pontos de coleta seletiva. O algoritmo de roteamento para pontos de coleta seletiva obteve resultados promissores, alcançando uma distância mínima de 26,82 km. Ainda, os resultados desta pesquisa podem ser usados para embasar futuras pesquisas visando resolver também o problema da escolha ótima de ordem de visitação dos pontos de coleta.

Palavras-chave: cidades inteligentes; pesquisa operacional; caminho otimo; menor custo; trajeto.

ABSTRACT

Smart cities are a new concept of cities that have emerged to deal with the increase in urban population and the need for urban planning. They can be defined by the use of technologies and data to improve the quality of life of their inhabitants. Selective waste collection is an important practice for preserving the environment and the sustainability of cities. The use of routing algorithms to plan efficient routes for waste collection can help reduce traffic congestion, minimize collection time, and reduce fuel costs. In this work, the application of the A* algorithm to the problem of selective waste collection in the city of Toledo-PR is proposed. Through on-site data collection, 84 selective collection points were mapped in the central region of the municipality. The graph of the central region, obtained through the public OpenStreetMap project, was used to solve the minimum path problem between the selective collection points. The routing algorithm for selective collection points achieved promising results, reaching a minimum distance of 26.82 km. Furthermore, the results of this research can be used to support future research aimed at also solving the problem of optimal choice of visitation order for collection points.

Keywords: smart cities; operational research; optimal route; minimum cost; path.

LIST OF ALGORITHMS

Algoritmo 1 – Algoritmo de Dijkstra 16
Algoritmo 2 – Algoritmo *A** 17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica do problemas das pontes de Königsberg 13
Figura 2 – Lixeiras de coleta seleta 18
Figura 3 – Posição das Lixeiras 19
Figura 4 – Grafo da região de Toledo-PR. 22
Figura 5 – Delimitação do setor central e demais setores de coleta seletiva em Toledo-PR. 25
Figura 6 – Caminho ótimo entre lixeiras da coleta seletiva de lixo em Toledo-PR. . 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das 84 lixeiras da coleta seletiva na região central de Toledo-PR. **19**

Tabela 2 – Deslocamentos sequenciais em metros entre lixeiras. **26**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

1.1 Objetivos 11

1.1.1 Objetivo geral 11

1.1.2 Objetivos específicos 11

1.2 Justificativa 12

1.3 Estrutura do trabalho 12

2 REFERENCIAL TEÓRICO 13

2.1 Teoria dos Grafos 13

2.1.1 Representação matemática de um grafo 13

2.1.2 Grafo Simples 14

2.1.3 Adjacência e grau de um vértice 14

2.1.4 Matriz de adjacência 14

2.1.5 Grafos ponderados 14

2.1.6 Grafos orientados 15

2.1.7 Caminho 15

2.1.8 Caminho Minimo 15

2.2 Algoritmo de Dijkstra 15

2.3 Algoritmo *A (A-estrela) 16**

3 MATERIAIS E MÉTODOS 18

3.1 Coleta de dados 18

3.2 Estruturação do grafo 21

3.3 Algoritmo de Roteamento - A* 22

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 24

4.1 Processamento 24

4.2 Trajeto atual 24

4.3 Trajeto otimizado 25

5 CONCLUSÃO 27

5.1 TRABALHOS FUTUROS 27

REFERÊNCIAS 28

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente de resíduos urbanos é um desafio complexo enfrentado por cidades em todo o mundo. No contexto específico da coleta seletiva, a otimização das rotas dos caminhões de coleta é uma peça-chave para melhorar a eficiência operacional, reduzir custos e minimizar o impacto ambiental associado a essa atividade, segundo Gomes *et al.* (2019) uma lista de coletas, com rota estabelecida, substituindo a listagem sem programação pode reduzir 48,1% nos custos logísticos, e uma redução de 46,9% na distância aplicada.

Este trabalho propõe abordar essa demanda específica, desenvolvendo e apresentando otimização de rotas da região central para a equipe de coleta seletiva em Toledo. A contextualização desta pesquisa está fundamentada na necessidade de aprimorar não apenas a eficiência operacional da coleta seletiva, mas também de contribuir para a construção de práticas urbanas mais sustentáveis e responsáveis.

A implementação bem-sucedida deste sistema não apenas reduzirá a pegada de carbono associada à coleta de resíduos, mas também terá implicações econômicas, operacionais e ambientais positivas para a comunidade de Toledo. Neste contexto, o presente capítulo visa apresentar as bases e a relevância deste estudo, delineando os objetivos e as motivações que orientarão toda a pesquisa.

1.1 Objetivos

Este capítulo desempenha um papel fundamental na estrutura deste estudo, delineando os propósitos e metas que norteiam a pesquisa sobre a otimização de rotas para a equipe de coleta seletiva em Toledo. Os objetivos delineados não apenas fornecem uma direção clara para a pesquisa, mas também estabelecem as bases para a criação de soluções inovadoras e práticas.

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar uma rota ótima para a equipe de coleta seletiva em Toledo mediante uma abordagem inovadora que reduza a distância total percorrida pelo caminhão de coleta, promovendo a eficiência operacional e minimizando o impacto ambiental associado a essa atividade.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os pontos de coleta seletiva reciclável na área escolhida (centro);
- Localizar as coordenadas geográficas dos pontos de coleta seletiva para mapeá-los;

- Identificar as restrições de tráfego e as capacidades de carga dos veículos de coleta;
- Criar grafo utilizando das informações coletadas;
- Utilizar algoritmo de minimização de rota para encontrar rota ótima;
- Propor rota ótima para os pontos encontrados.

1.2 Justificativa

A coleta seletiva reciclável é uma prática importante para a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade. No entanto, a eficiência da coleta seletiva pode ser prejudicada se a rota de coleta não for otimizada. A otimização da rota de coleta pode ajudar a reduzir o tempo e os custos associados à logística (GOMES *et al.*, 2019). Portanto, encontrar a rota ótima da coleta seletiva reciclável é um problema importante que merece atenção em pesquisas acadêmicas. Ainda, o fruto desta pesquisa reflete-se na forma de retorno direto à sociedade do município de Toledo pelo investimento realizado na academia, na forma de conhecimento especializado e aplicado em um problema real.

1.3 Estrutura do trabalho

Este documento segue uma estrutura organizacional que se desdobra da seguinte forma: o Capítulo 2 aborda uma revisão literária dos temas essenciais para o entendimento deste trabalho, sendo esses elementos utilizados como base para sustentar a proposta discutida no Capítulo 3. Os resultados derivados dessa abordagem são detalhados e analisados no Capítulo 4, culminando nas conclusões destacadas no Capítulo 5, juntamente com os trabalhos futuros.

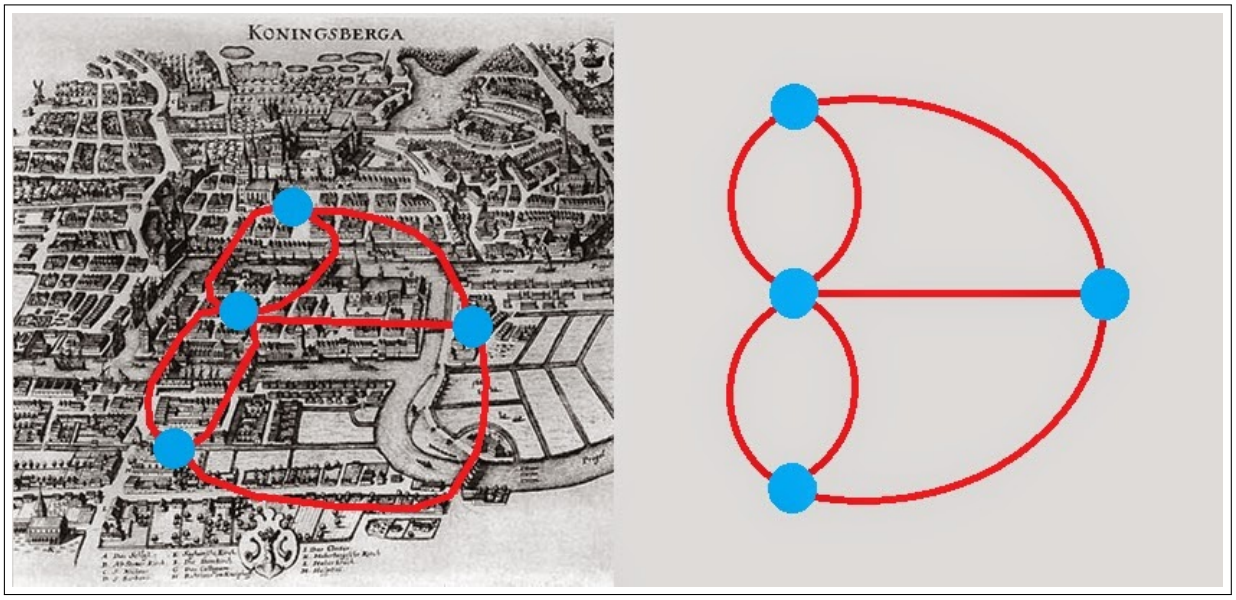
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo se propõe a realizar uma revisão crítica da literatura relevante, concentrando-se na aplicação de algoritmos determinísticos, com foco particular no algoritmo A*, na otimização de rotas para a coleta seletiva no setor central do município de Toledo, Paraná.

2.1 Teoria dos Grafos

Segundo Brito (2015), em 1736, um problema apresentado na cidade de Königsberg, atual Kalingrado, tinha como objetivo cruzar as sete pontes de acesso que interligavam as duas partes continentais e duas ilhas da cidade, passando somente uma vez por cada uma das pontes. O matemático Leonhard Euler então criou a teoria dos grafos para de forma diagramada provar que era impossível tal feito (LUCCHESI, 2017). Utilizou-se cada uma das regiões continentais e ilhas como nodos, e as pontes como arestas que interligavam entre eles, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação gráfica do problemas das pontes de Königsberg



Fonte: (BRITO, 2015)

2.1.1 Representação matemática de um grafo

Um grafo estabelece a relação entre um objeto e um determinado conjunto, podendo ser apresentado graficamente pela representação de seus pontos como vértices e suas ligações por arestas, ou de diferentes formas matriciais (JESUS, 2018).

Um grafo *G* pode ser representado por um conjunto de vértices *V*, e um conjunto de pares de vértices, chamados arestas *E*, na forma:

$$G = (V,E) \ . \tag{1}$$

2.1.2 Grafo Simples

Um grafo é considerado simples quando existem apenas pares de vértices conectados por uma aresta, e não há *loops*, ou seja, vértices ligados a si próprios (JESUS, 2018).

2.1.3 Adjacência e grau de um vértice

Dois vértices são adjacentes quando estão conectados por uma aresta, e o grau deu um vértice é definido pela quantidade de arestas com conexão com o mesmo (JESUS, 2018).

2.1.4 Matriz de adjacência

A representação de um grafo pode ser realizada de maneira matricial por meio de uma matriz de adjacência. Essa matriz é quadrada, com a ordem correspondente à quantidade de vértices no grafo, e os elementos da matriz indicam o grau de adjacência entre os vértices. Tomando como exemplo o grafo ilustrado na Figura 1, referente ao problema de Königsberg, a representação matricial de adjacência seria a seguinte:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.1.5 Grafos ponderados

Grafos ponderados, valorados ou ainda rede, são grafos com valores associados aos vértices. Os valores, também conhecidos como pesos, podem representar informações pertinentes a uma abstração. Por exemplo, num grafo representando ruas de uma cidade, os pesos podem significar o custo de uma via em termos de distância ou tempo.

2.1.6 Grafos orientados

Grafos orientados, também referidos como grafos direcionados, são caracterizados pela atribuição de uma direção a cada aresta. Essa direcionalidade implica que a relação entre dois vértices não é simétrica, conferindo uma orientação específica à conexão entre eles (JESUS, 2018). A utilidade dos grafos direcionados torna-se evidente em contextos que envolvem problemas de caminho ou rotas, nos quais é crucial representar a existência de caminhos de mão única ou impor restrições quanto ao retorno a vértices específicos. Essa capacidade de modelar relações direcionadas desempenha um papel essencial na resolução de problemas práticos, como em redes de transporte ou sistemas de roteamento, onde as direções das conexões têm significados específicos e influenciam diretamente a solução desses problemas.

2.1.7 Caminho

Caminho é uma sequência de vértices adjacentes. Através dos conceitos de adjacência e caminho é possível determinar a conectividade de um grafo. Em um grafo G, dois vértices estão conectados se existe um caminho possível entre esses dois vértices (DIESTEL; SCHRIJVER; SEYMOUR, 2016) apud (STARK, 2021).

2.1.8 Caminho Minimo

Caminho mínimo é um problema fundamental em teoria dos grafos que busca determinar a rota mais eficiente entre dois vértices distintos em um grafo. Em grafos ponderados, nos quais cada aresta possui um custo associado, o caminho mínimo refere-se à trajetória que implica o menor custo total, considerando a soma dos pesos das arestas percorridas (OLIVEIRA, 2023). Essa abordagem é essencial em diversas aplicações práticas, como redes de transporte, logística, comunicações e planejamento de rotas, onde a minimização de custos é um critério crucial para a eficiência do sistema. Portanto, o problema do caminho mínimo desempenha um papel central na otimização de trajetórias e na tomada de decisões em diversos contextos, contribuindo para a resolução eficiente de problemas complexos.

2.2 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo proposto por Dijkstra em 1956 é utilizado para encontrar a menor distância entre dois vértices em um grafo ponderado (NEVES, 2007). Essa técnica opera através da construção de uma árvore de caminho mínimo (CORMEN *et al.*, 2009). Inicializando a partir de um vértice inicial, o algoritmo explora sistematicamente todos os seus vizinhos, atualizando iterativamente os custos para alcançar cada um deles. Em seguida, o algoritmo seleciona o

vértice com o custo mais baixo, repetindo o processo até que todos os vértices tenham sido incluídos na árvore.

Ao aplicar esse método, uma árvore de caminho mínimo é construída, fornecendo uma representação visual e estruturada dos caminhos mais curtos entre o vértice inicial e todos os outros vértices no grafo. Cada aresta na árvore representa um caminho mínimo, destacando a rota mais eficiente para atingir cada vértice (CORMEN *et al.*, 2009).

Algorithm 1 Algoritmo de Dijkstra

```
Inicialize a lista de distâncias
Inicialize a lista de visitados
Inicialize a lista de não visitados
Defina a distância do nó inicial como 0
Adicione o nó inicial à lista de visitados
enquanto a lista de visitados não contiver todos os nós faça
    Encontre o nó com a menor distância na lista de visitados, chame-o de "nó atual"
    para cada vizinho do nó atual faça
        se o vizinho não foi visitado então
            Calcule a nova distância do vizinho
            se a nova distância é menor que a distância anterior então
                Atualize a distância do vizinho
                Adicione o vizinho à lista de visitados
            finaliza se
        finaliza se
    finaliza para
finaliza enquanto=0
```

Fonte: Adaptado de Cormen *et al.* (2009), Russell e Norvig (2010).

Vale ressaltar que o algoritmo de Dijkstra é aplicável a grafos direcionados e não direcionados, desde que os pesos nas arestas sejam não negativos (CORMEN *et al.*, 2009). Além disso, é uma ferramenta fundamental em várias aplicações práticas, como roteamento de redes, otimização de trajetos em logística e planejamento de transporte.

A seguir será visto que o algoritmo de Dijkstra é um caso especial do algoritmo de busca A* quando a heurística utilizada é nula.

2.3 Algoritmo *A** (A-estrela)

A busca em largura (*Breadth First Search* - BFS) percorre todos os vizinhos de um nó antes de passar para os vizinhos dos vizinhos. Essa abordagem garante que todos os caminhos em um raio crescente sejam explorados antes de se afastar mais. O algoritmo de Dijkstra, por outro lado, determina o menor caminho entre dois nós atribuindo pesos às arestas e escolhendo os caminhos de menor custo.

No caso do A*, a heurística é introduzida para estimar a distância restante de um nó ao objetivo. Essa estimativa, muitas vezes chamada de função heurística $h(n)$, é somada ao custo real já percorrido $g(n)$ para formar a função de avaliação total $f(n) = g(n)+h(n)$. O A* escolhe

expandir os nós com os menores valores de $f(n)$, o que equilibra a busca entre a eficiência de Dijkstra e a direção informada pela heurística. Essa combinação inteligente de heurística ajuda o A* a evitar a exploração desnecessária de caminhos que se afastam do objetivo, como no Dijkstra.

Algorithm 2 Algoritmo *A**

```
Inicialize a lista aberta
Inicialize a lista fechada
Adicione o nó inicial à lista aberta
enquanto a lista aberta não estiver vazia faça
    Encontre o nó com o menor valor f na lista aberta, chame-o de "nó atual"
    Remova o nó atual da lista aberta
    Gere os sucessores do nó atual e defina seus pais como o nó atual
    para cada sucessor faça
        se o sucessor é o objetivo então
            retorna o sucessor
        finaliza se
        se o sucessor não está na lista fechada então
            Calcule os valores g e h do sucessor
            Adicione o sucessor à lista aberta
        finaliza se
    finaliza para
    Adicione o nó atual à lista fechada
finaliza enquanto=0
```

Fonte: Adaptado de Russell e Norvig (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados e os métodos adotados durante a condução desta pesquisa. São descritos o processo de coleta de dados, destacando a abordagem manual adotada para mapear a localização das lixeiras nas ruas. Em seguida, será abordada a estruturação do grafo, no qual as informações coletadas foram representadas de maneira matemática, refletindo as relações espaciais entre as lixeiras.

3.1 Coleta de dados

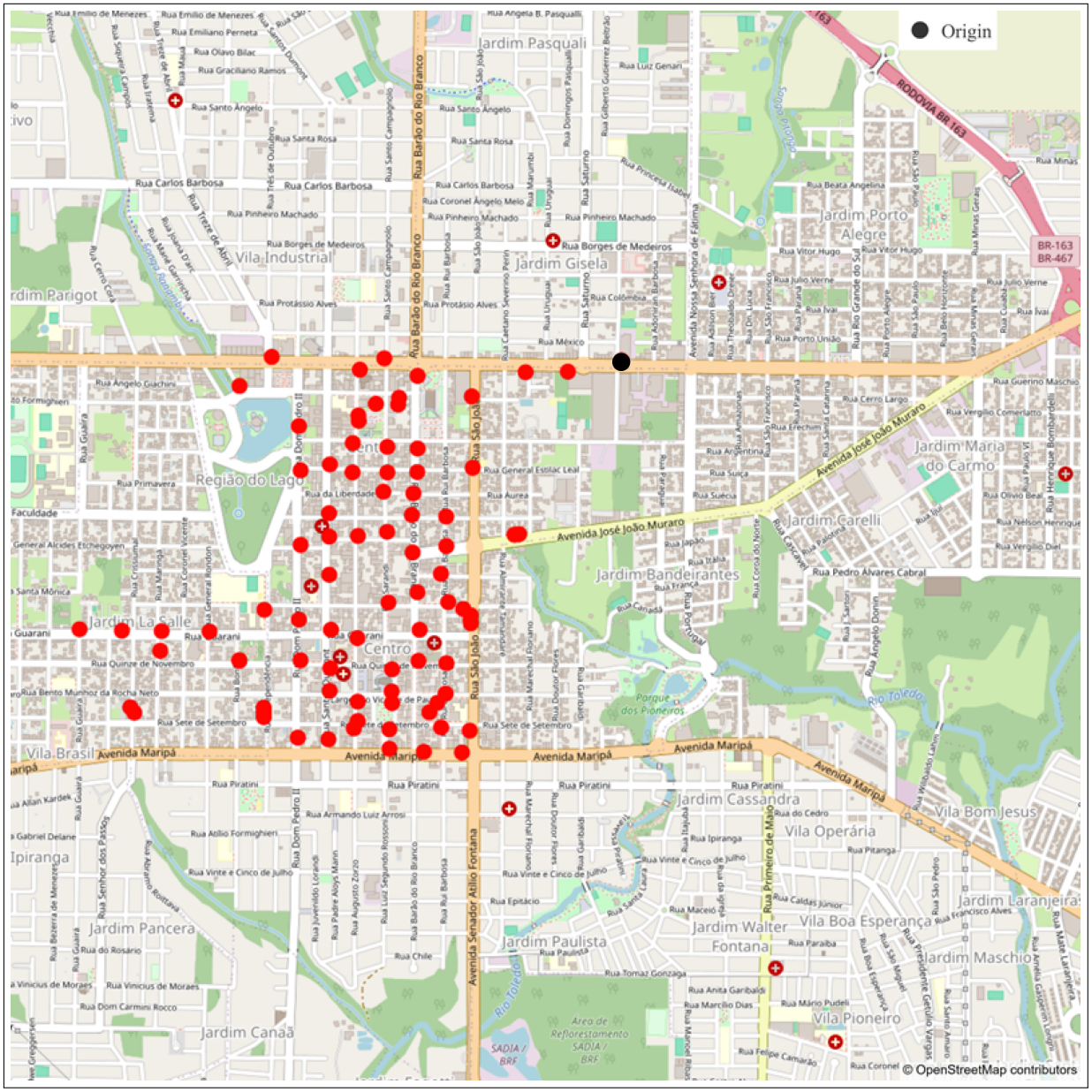
A coleta de dados para este estudo foi realizada de maneira manual, com a abordagem *in loco* para obter informações sobre a localização das caçambas de lixo reciclável, alguns exemplos exibidos na Figura 2, ao longo das ruas delimitadas como "centro"no regime de coleta de lixo de Toledo-Pr. Esse procedimento envolveu a visita física aos locais onde as lixeiras estavam instaladas, permitindo a observação direta e a demarcação de suas posições em um mapa específico.

Figura 2 – Lixeiras de coleta seleta

Fonte: Autoria Própria, 2023

Durante as visitas aos locais, foram registradas as coordenadas geográficas das lixeiras, levando em consideração apenas a sua posição absoluta durante a coleta. Esses detalhes foram anotados meticulosamente para garantir a precisão na representação do ambiente, gerando assim um mapa georeferencial dos locais de interesse, dispostos na Figura 3. As coordenadas geográficas dos 84 lixeiros são apresentadas na Tabela 1.

Figura 3 – Posição das Lixeiras



Fonte: Autoria Própria, 2023

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das 84 lixeiras da coleta seletiva na região central de Toledo-PR.

LATITUDE	LONGITUDE
-24.719845	-53.730182
-24.720254	-53.732328

continua na próxima página

LATITUDE	LONGITUDE
-24.720274	-53.734023
-24.720410	-53.738357
-24.719769	-53.739694
-24.720183	-53.740673
-24.719714	-53.744208
-24.720775	-53.745498
-24.722236	-53.743116
-24.721850	-53.740734
-24.722043	-53.740718
-24.721424	-53.740026
-24.721206	-53.739102
-24.721450	-53.739138
-24.721154	-53.736182
-24.723756	-53.736148
-24.725532	-53.737210
-24.725474	-53.738588
-24.724686	-53.738524
-24.723910	-53.738371
-24.723052	-53.738358
-24.722994	-53.739570
-24.723921	-53.739570
-24.724628	-53.739730
-24.725413	-53.741911
-24.723922	-53.740968
-24.723632	-53.741874
-24.722856	-53.740956
-24.723852	-53.743048
-24.726564	-53.743048
-24.726263	-53.741900
-24.727653	-53.741900
-24.726240	-53.740751
-24.726089	-53.739578
-24.728662	-53.739527
-24.726842	-53.738557
-24.728291	-53.738366
-24.728650	-53.737128
-24.727619	-53.737421
-24.726610	-53.737205
-24.726193	-53.734474
-24.726170	-53.734283
-24.728928	-53.744503
-24.730785	-53.745501
-24.732493	-53.744533
-24.732665	-53.744530
-24.732838	-53.744530
-24.730764	-53.745510
-24.729720	-53.746706
-24.729706	-53.748624
-24.729692	-53.750218

continua na próxima página

LATITUDE	LONGITUDE
-24.729637	-53.751917
-24.730425	-53.748682
-24.732481	-53.749882
-24.732678	-53.749720
-24.729286	-53.743117
-24.730768	-53.743054
-24.733586	-53.743163
-24.733651	-53.741936
-24.731882	-53.741885
-24.731060	-53.741859
-24.729657	-53.741834
-24.729959	-53.740775
-24.732276	-53.740762
-24.732983	-53.740762
-24.733250	-53.740915
-24.733992	-53.739486
-24.733284	-53.739490
-24.732329	-53.739382
-24.731903	-53.739400
-24.731100	-53.739382
-24.729659	-53.738278
-24.730789	-53.738323
-24.732319	-53.737565
-24.733214	-53.737413
-24.734128	-53.736578
-24.734102	-53.738109
-24.732663	-53.737886
-24.731983	-53.737232
-24.730876	-53.737203
-24.728896	-53.736525
-24.729131	-53.736222
-24.729296	-53.736237
-24.729420	-53.736222
-24.733334	-53.736267

Fonte: Autoria Própria, 2023

3.2 Estruturação do grafo

Após a coleta manual dos dados, as informações geográficas da região central de Toledo-PR foram codificadas na forma de um grafo usando a biblioteca para *Python OSMnx*. Os dados do grafo são disponibilizados pelo projeto público de mapeamento *OpenStreetMap*. Dessa forma é possível obter uma representação matemática que captura as relações espaciais entre as lixeiras. Cada lixeira foi mapeada como um vértice no grafo, e as arestas foram estabelecidas para indicar a conectividade entre as lixeiras. A direcionalidade dessas arestas foi considerada, refletindo a disposição física das lixeiras ao longo das ruas.

Figura 4 – Grafo da região de Toledo-PR.

Fonte: Autoria Própria, 2023

3.3 Algoritmo de Roteamento - A*

Os dados estruturados no grafo foram então submetidos a um algoritmo de roteamento baseado no algoritmo A*. O A* é amplamente reconhecido por sua eficácia em encontrar o

caminho mais eficiente entre dois pontos em um grafo ponderado, considerando não apenas a distância, mas também fatores de custo relevantes.

A aplicação do algoritmo A* permitiu a otimização da rota para a coleta de lixo, levando em consideração variáveis como a distância entre as lixeiras, o tempo de percurso e outras métricas específicas ao contexto. Os resultados obtidos através desse processo contribuem para uma abordagem eficiente e fundamentada na resolução do problema de otimização da coleta de lixo em ambientes urbanos.

O roteamento inicia no vértice correspondente as coordenadas do primeiro lixeiro da Tabela 1 e segue sucessivamente para as coordenadas seguintes, iterando um total de 83 vezes.

É necessário observar que esta abordagem resolve o problema local de otimização de caminho entre vértices e depende da ordem em que os vértices são estudados. A ordem utilizada neste trabalho é a mesma da Tabela 1. O problema global de otimização da visitação de vértices, equivalente ao problema do caxeiro viajante, não é abordado neste estudo. Uma alternativa simples seria uma abordagem de embaralhamento aleatório da lista de vértices.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos através da implementação e execução do algoritmo de minimização de rota derivado do algoritmo *A** para otimizar o trajeto do caminhão de coleta seletiva em Toledo. Abordam-se os principais aspectos do processo de processamento, avaliando a eficácia e eficiência do algoritmo na geração de rotas ótimas.

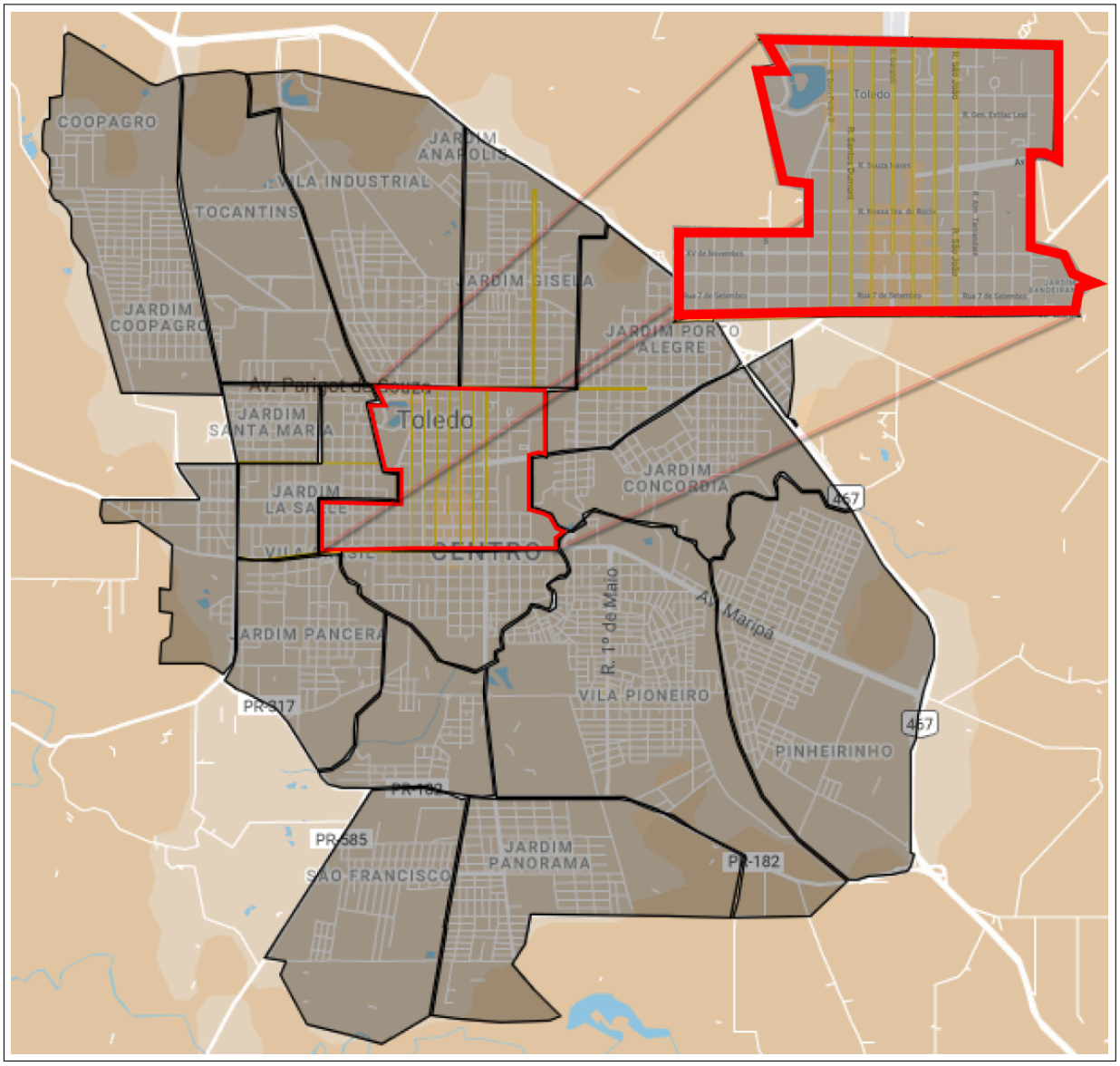
4.1 Processamento

O algoritmo desenvolvido baseia-se na otimização de rota entre lixeiras utilizando o algoritmo *A**, incorporando adaptações específicas para atender às demandas da coleta seletiva. Uma das adaptações é a consideração de que lixeiras distantes até 50m de um ponto não necessitam de deslocamento do caminhão, pois os profissionais da coleta manualmente deslocam essas lixeiras a fim de minimizar deslocamentos horizontais do caminhão. São considerados os pontos de coleta e restrições operacionais de tráfego.

4.2 Trajeto atual

O trajeto atual utilizado pela coleta seletiva contempla o conceito de setorização em grade, apresentado na Figura 5. Essa abordagem é simples de ser executada, porém, pode ser considerada de baixa eficiência, pois o trajeto realizado pelo caminhão de coleta percorre longos trechos sem lixeiras.

Figura 5 – Delimitação do setor central e demais setores de coleta seletiva em Toledo-PR.



Fonte: Secretaria de Meio Ambiente (Toledo - PR) (SILVA, 2023).

4.3 Trajeto otimizado

O trajeto otimizado foi obtido pelo método descrito no Capítulo 3. A partir do primeiro lixeiro é utilizado o algoritmo *A** para encontrar a melhor rota até o próximo lixeiro, iterando pelo conjunto de lixeiras, considerando a distância entre lixeiras como métrica heurística e as distâncias em trecho reto de ruas como pesos das arestas no grafo.

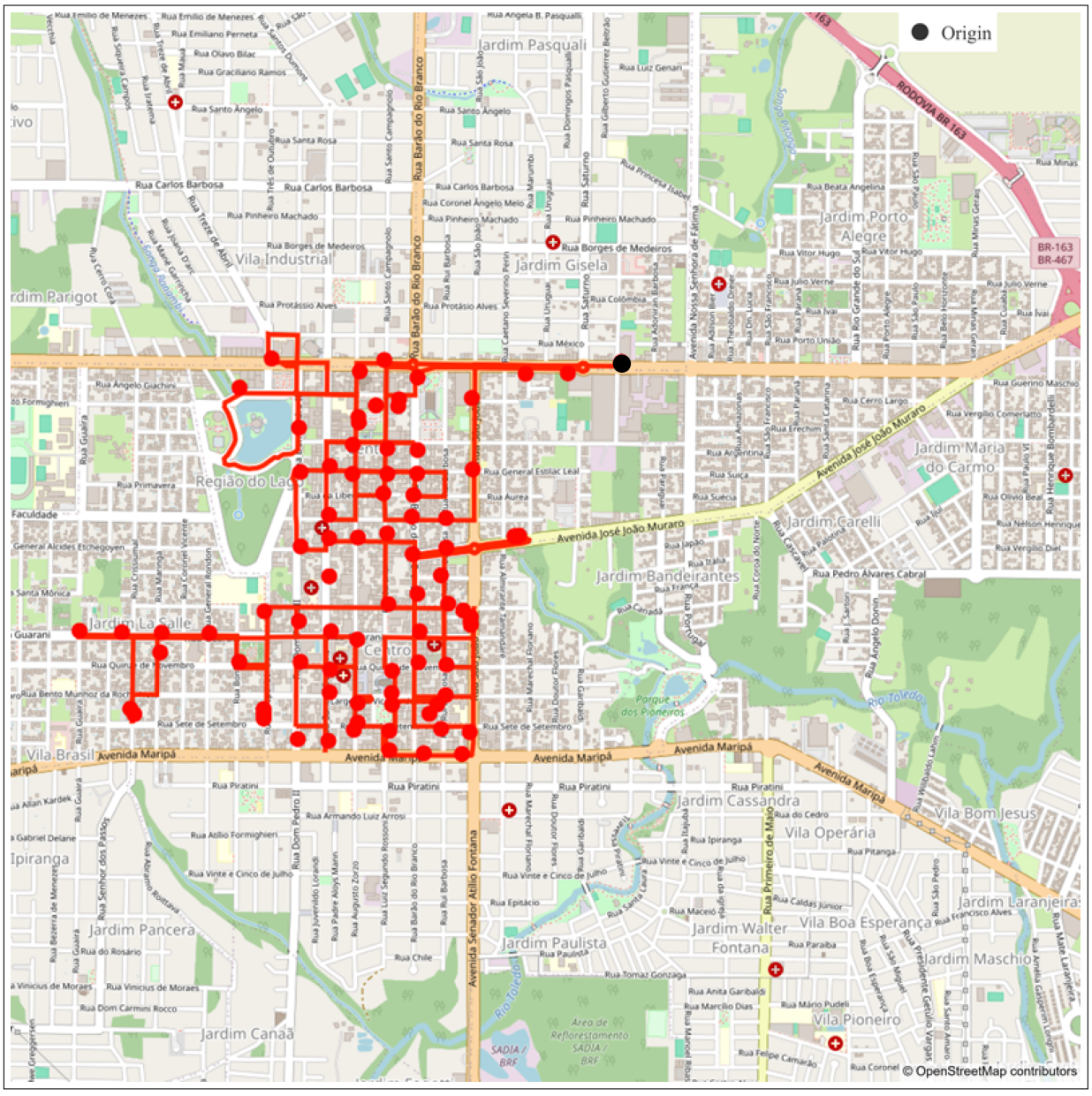
O caminho ótimo entre lixeiras é apresentado na Figura 6. O trecho total a ser percorrido pelo caminhão de coleta seletiva de lixo é de 26,82km, conforme somatório da Tabela 2, resultando num tempo de viagem total de aproximadamente 54 minutos, considerando uma velocidade média de 30 km/h. Para referência do leitor, observa-se que o primeiro trecho em linha reta na Av. Parigot de Souza equivale a aproximadamente 1,5km.

Tabela 2 – Deslocamentos sequenciais em metros entre lixeiras.

996,43	759,40	1058,85	578,44	134,66	591,59	795,57	716,49	521,16	0
397,47	0	0	623,49	283,9	316,5	120,67	535,3	341,72	357,3
119,09	357,45	335,62	532,23	316,51	117,91	226,17	343,18	337,87	152,7
34,24	153,33	122,11	504,53	438,07	215,82	362,11	123,73	389,69	556
0	1320,4	357,86	251,55	111,08	0	362,04	237,75	201,54	98,2
220,21	436,5	227,2	111,16	1129,19	454,25	265,3	227,63	245,06	575,02
143,57	131,86	269,1	256,06	0	222,64	82,73	141,21	38,46	79,46
777,9	120,28	246,91	350,68	293,56	167,34	559,85	42,47	352,29	368,86
12,95	0	94,34	371,32						

Fonte: O Autor.

Figura 6 – Caminho ótimo entre lixeiras da coleta seletiva de lixo em Toledo-PR.



Fonte: Autoria Própria, 2023

5 CONCLUSÃO

As cidades inteligentes são aquelas que utilizam tecnologia para melhorar a qualidade de vida de seus habitantes. Uma das áreas em que a tecnologia pode ser aplicada é a coleta seletiva de lixo. Algoritmos de roteamento podem ser usados para planejar rotas eficientes para a coleta de lixo, reduzindo o tempo e o custo do processo ao planejar rotas otimizadas.

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que a rota ótima gerada pelo algoritmo derivado do *A** apresenta-se como uma solução eficaz para otimizar o trajeto do caminhão de coleta seletiva. A provável redução na distância percorrida e a capacidade de adaptação a variáveis dinâmicas reforçam a aplicabilidade prática deste modelo.

Contudo, é essencial reconhecer que a coleta seletiva é apenas uma parte de um sistema mais amplo. A eficácia da rota ótima está intrinsecamente ligada à consideração de outros setores de coleta que operam em dias específicos. Assim, torna-se imperativo que a equipe de coleta seletiva trabalhe de maneira integrada com os demais setores, a fim de otimizar o fluxo operacional geral.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a necessidade de uma abordagem integrada, sugere-se que trabalhos futuros foquem na criação de um sistema abrangente que una as rotas otimizadas de todos os setores de coleta. A integração de tecnologias avançadas, como sensores de monitoramento em tempo real, pode ser explorada para ajustar dinamicamente as rotas com base em condições em constante mudança.

Enquanto este trabalho focou na otimização da rota entre pontos de coleta, portanto uma otimização local, propõe-se também no futuro abordar o problema do ponto de vista da otimização global. Isto é, otimizar a escolha de visitação dos pontos de coleta, o equivalente ao problema do cacheiro viajante, de complexidade teórica computacional na classe *NP-hard*. Visando este objetivo estipulam-se aplicações de abordagens de embaralhamento aleatório dos pontos de coleta ou aplicações de metaheurísticas como otimização discreta por colonia de formigas (Discrete Ant Colony Optimization) ou o algoritmo genético com operador de manutenção de ordem pelo cruzamento parcialmente mapeado (*Genetic Algorithm - Partially Mapped Crossover Operator*).

REFERÊNCIAS

BRITO, F. **As Sete Pontes de Konigsberg**. [*S.l.*], 2015. Disponível em: http://matematicacomge.blogspot.com/2015/01/as-sete-pontes-de-konigsberg.html.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms, Third Edition**. 3rd. ed. [*S.l.*]: The MIT Press, 2009.

DIESTEL, R.; SCHRIJVER, A.; SEYMOUR, P. **Graph Theory**. [*S.l.*]: EMS PRESS, 2016.

GOMES, J. A. C.; SANTOS, J. R. T.; BARBOSA, G. V. D.; CARVALHO, G. B. Aplicação de ferramenta computacional na otimização e mitigação de custos na roteirização da logística de transporte de cargas. **Brazilian Journal of Development**, 2019.

JESUS, J. V. O. D. **Introdução à Teoria Espectral de Grafo**. 2018. Tese (Doutorado) — Universidade da Madeira, 2018.

LUCCHESI, C. L. **Introdução à Teoria dos Grafos**. [*S.l.*]: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 2017.

NEVES, P. T. Variações e aplicações do algoritmo de dijkstra. 2007.

OLIVEIRA, R. P. d. Como a teoria dos grafos pode ser usada no cotidiano: aplicação usando o algoritmo de dijkstra. CESTB - Trabalho de Conclusão de Curso Graduação, 2023.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3. ed. [*S.l.*]: Prentice Hall, 2010.

SILVA, S. T. da. **Secretaria do Meio Ambiente de Toledo-PR, Mapa da Coleta Seletiva**. [*S.l.*], 2023. Disponível em: https://www.toledo.pr.gov.br/secretarias/secretaria_meio_ambiente.

STARK, F. A. Modelagem baseada em grafos para sistemas de controle descritos por espaços de estados. 2021.