

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

DOUGLAS NERES DA SILVA

**ANÁLISE DE ROTEIROS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE PALMAS – TO**

PALMAS-TO

2024

DOUGLAS NERES DA SILVA

**ANÁLISE DE ROTEIROS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE PALMAS – TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia da Silva Aguiar
Rezende

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo da Silva
Santos

PALMAS – TO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S586a Silva, Douglas Neres da
Análise de Roteiros de Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos no
Município de Palmas - TO / Douglas Neres da Silva. – PALMAS, TO,
2024.
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

Orientadora: Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
Coorientador: Dr. Carlos Eduardo da Silva Santos

1. Coleta de resíduos sólidos urbanos. 2. Otimização de rotas. 3.
Problema do Carteiro Chinês. I. Rezende, Cláudia da Silva Aguiar. II.
Santos, Carlos Eduardo da Silva. III. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

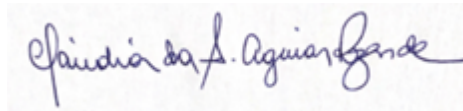
DOUGLAS NERES DA SILVA

**ANÁLISE DE ROTEIROS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE PALMAS – TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

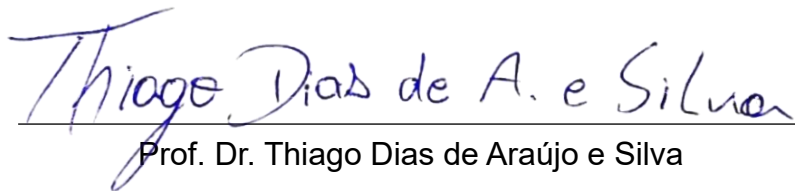
Aprovado em: 27 / 06 / 2024

BANCA AVALIADORA



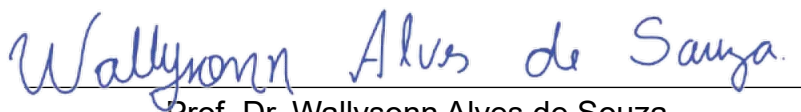
Profa. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende (Orientadora)

IFTO – Campus Palmas



Prof. Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva

IFTO – Campus Palmas



Prof. Dr. Wallysonn Alves de Souza

IFTO – Campus Palmas

Dedico este trabalho a Deus que com sua infinita sabedoria foi o guia nessa minha jornada e a minha família que sempre esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, cuja presença constante em minha vida me fortaleceu e guiou ao longo desta jornada. Sua graça e sabedoria iluminaram meu caminho e me proporcionaram a força necessária para enfrentar e superar todos os desafios que encontrei.

À minha família, minha base, expresso minha profunda gratidão. Aos meus pais, por todo amor incondicional, por acreditarem em mim e me apoiarem em cada passo. Obrigado por serem meu porto seguro, agradeço de coração.

À minha orientadora, Prof. Dra. Cláudia, cujas orientações e apoios foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho, registro minha imensa gratidão.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Carlos, expresso também minha sincera gratidão. Sua contribuição valiosa e sua disposição em compartilhar conhecimento enriqueceram significativamente este trabalho.

Aos meus amigos e colegas, que compartilharam comigo momentos de estudo, desafios e conquistas, deixo meu mais sincero agradecimento. Cada conversa, cada risada e cada momento de companheirismo contribuíram para tornar essa caminhada mais leve e enriquecedora.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento.

Sem vocês, nada disso seria possível.

RESUMO

O crescimento populacional, aliado ao aumento do consumismo, tem causado um expressivo aumento na quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU). Diante desse cenário, os municípios enfrentam crescentes desafios no gerenciamento desses resíduos sólidos. O gerenciamento de RSU, sendo um serviço essencial para a qualidade de vida nas cidades, saúde pública e preservação ambiental, abrange atividades como coleta, transporte e destinação final. Dentre essas atividades, os serviços de coleta e transporte destacam-se como os mais onerosos, representando entre 75% e 80% dos recursos destinados à limpeza urbana. Uma rota eficiente de coleta de RSU pode resultar em economias significativas para os municípios, uma vez que uma rota otimizada implica menor distância percorrida por veículos e redução do tempo de coleta. Isso pode representar economia de combustível e menor desgaste dos veículos. Nesse contexto, o presente trabalho visa analisar e propor uma otimização da rota de número 10, que engloba as quadras 303 e 305 Norte, no município de Palmas, estado do Tocantins. A abordagem consiste em modelar o problema como o Problema do Carteiro Chinês (PCC). A técnica consiste em transformar o grafo da rota em um grafo euleriano, permitindo encontrar a rota de menor percurso possível. A proposta apresentada mostrou que é possível melhorar o roteiro atualmente praticado, o que implica em economia na prestação do serviço de coleta e transporte dos RSU.

Palavras-chave: Coleta de resíduos sólidos urbanos. Otimização de rotas. Problema do Carteiro Chinês.

ABSTRACT

Population growth, combined with the increase in consumerism, has caused a significant increase in the amount of municipal solid waste (MSW). In this context, municipalities face growing challenges in managing this waste. MSW management, being an essential service for quality of life in cities, public health, and environmental preservation, encompasses activities such as collection, transportation, and final disposal. Among these activities, collection and transportation services stand out as the most costly, representing between 75% and 80% of the resources allocated to urban cleaning. An efficient MSW collection route can result in significant savings for municipalities, as an optimized route implies shorter distances traveled by vehicles and reduced collection time. This can lead to fuel savings and less vehicle wear and tear. In this context, the present study aims to analyze and propose an optimization of route number 10, which covers blocks 303 and 305 North, in the municipality of Palmas, state of Tocantins. The approach involves modeling the problem as the Chinese Postman Problem (PCP). The technique consists of transforming the route's graph into an Eulerian graph, allowing for the identification of the shortest possible route. The proposed solution has shown that it is possible to improve the currently practiced route, which implies cost savings in the provision of MSW collection and transportation services.

Keywords: Urban solid waste collection. Route optimization. Chinese Postman Problem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	16
Figura 02 - Caminhão com carroceria do tipo basculante convencional.....	19
Figura 03 - Caminhão com carroceria do tipo baú ou prefeitura.....	20
Figura 04 - Caminhão com carroceria compactadora.....	21
Figura 05 - Foto aérea do aterro sanitário de Brasília/DF.....	22
Figura 06 - Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil.....	22
Figura 07 - Composição gravimétrica dos RSU de Palmas.....	25
Figura 08 - Apresentação para coleta (Armazenamento temporário)	26
Figura 09 - Caçambas estacionárias para depósito voluntário de RSU.....	26
Figura 10 - Células finalizadas do Aterro Sanitário Municipal de Palmas.....	28
Figura 11 - Custos anuais com o serviço de limpeza urbana de Palmas.....	29
Figura 12 - As pontes de Königsberg.....	33
Figura 13 - Esquema de Euler para as pontes de Königsberg.....	33
Figura 14 - Indicação da localização do município de Palmas.....	38
Figura 15 - Mapeamento do roteiro de coleta das quadras 303 e 305 Norte.....	42
Figura 16 - Polígono que delimita a região das quadras 303 e 305 Norte.....	46
Figura 17 - Grafo das quadras 303 e 305 Norte gerado pelo algoritmo.....	47
Figura 18 - Grafo corrigido das quadras 303 e 305 Norte.....	48
Figura 19 - Grafo do roteiro de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte	50
Figura 20 - Rota ótima obtida pelo algoritmo para quadras 303 e 305 Norte	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Série histórica dos RSU coletadas em Palmas/TO.....	24
Quadro 02 – Programação da coleta de RSU em Palmas	39
Quadro 03 – Resultados obtidos pelo algoritmo para a rota de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte	49
Quadro 04 – Resultados obtidos pelo algoritmo para a rota ótima de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte	51
Quadro 05 – Economia na distância percorrida ao longo de um ano	52
Quadro 06 – Descrição dos custos mensais de um veículo	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde

Hab – Habitante

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Kg – Quilograma

Km - Quilômetro

NBR - Norma Brasileira

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PCC - Problema do Carteiro Chinês

PCCND - Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado

PCCD - Problema do Carteiro Chinês Direcionado

PCCM - Problema do Carteiro Chinês Misto

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas-TO

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS - Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento

SEISP - Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos

SIG - Sistema de Informações Geográficas

Ton – Tonelada

GPS – Sistema Global de Posicionamento

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

PNG – Gráficos Portáteis de Rede

SVG – Gráfico Vetorial Escalonável

CSV – Valores Separados por Vírgulas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema da pesquisa	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduos Sólidos Urbanos	15
2.2 Sistema de Gestão dos Resíduos Sólidos	16
2.2.1 Produção e geração de resíduos sólidos	16
2.2.2 Acondicionamento	17
2.3 Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos	18
2.3.1 Transporte	19
2.3.2 Disposição final	21
2.4 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Palmas	23
2.4.1 Caracterização do município de palmas	23
2.4.2 Gerenciamento integrado dos RSU no município de palmas	23
2.4.2.1 <i>Produção e geração dos resíduos sólidos</i>	23
2.4.2.2 <i>Acondicionamento</i>	25
2.4.2.3 <i>Coleta de resíduos sólidos</i>	27
2.4.2.4 <i>Transporte</i>	27
2.4.2.5 <i>Disposição final</i>	28
2.4.3 Custos com coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos em Palmas	29
2.5 Otimização de Roteiros de Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos	29
2.5.1 Modelagem do Problema de Coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos	30
2.5.2 Teoria dos Grafos	32

2.5.3	Problema do Carteiro Chinês	34
2.5.3.1	<i>Algoritmo de Dijkstra</i>	36
3.	METODOLOGIA	37
3.1	Área de Estudo	37
3.2	Rotas de Coleta	38
3.3	Levantamento de dados	40
3.3.1	Metodologia de coleta dos dados em campo	41
3.3.2	Processamento dos dados coletados	41
3.3.3	Tratamento dos dados coletados	41
3.4	Aplicação do Problema do Carteiro Chinês e Algoritmo de Dijkstra	42
3.5	Implementação do Algoritmo em Python	43
3.5.1	Bibliotecas utilizadas	43
3.5.2	Resolução do problema	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Discussão dos resultados encontrados	49
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional atrelado ao aumento do consumismo tem resultado em significativos desafios para os municípios no que se refere ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Conforme dados apresentados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o Brasil gerou, no ano de 2022, um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Os custos associados aos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos atingiram a marca de R\$ 28 bilhões no ano de 2021 (ABRELPE, 2022).

A coleta desses resíduos desempenha um papel crucial na preservação ambiental, na saúde pública e na sustentabilidade das áreas urbanas. A Lei nº 14.026, que atualiza o marco legal de saneamento básico, considera a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos domiciliares como conjunto de serviços de saneamento básico, sendo dos municípios a responsabilidade pela prestação desses serviços (Brasil, 2020).

Os serviços de limpeza urbana também desempenham um papel fundamental na manutenção da ordem pública, tornando as cidades mais atraentes e acolhedoras, promovendo qualidade de vida para os habitantes. Em resumo, o serviço de limpeza urbana é uma medida indispensável para o meio ambiente, a saúde pública e o bem-estar da sociedade.

Dentre os serviços associados ao gerenciamento dos resíduos sólidos destacam-se os serviços de coleta, transporte e destinação final. De acordo com a ABRELPE (2022), o serviço de coleta de resíduos atingiu uma cobertura de 93% do país no ano de 2022. Atrelado a isso, a prestação do serviço de coleta representou um custo aproximado de R\$10,95 por habitante/mês. O Instituto Brasileiro de Administração Municipal destaca que o serviço de limpeza urbana absorve de 7 a 15% do orçamento municipal (IBAM, 2021). Complementando, Wu (2020) afirma que somente os serviços de coleta e transporte consomem em torno de 75 a 80% dos recursos destinados a limpeza urbana, sendo, portanto, o componente mais oneroso no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos.

Dessa forma, os problemas de otimização de rotas surgem em diversos contextos nos quais há a necessidade de minimizar os percursos da rota, como, por exemplo, na coleta de resíduos sólidos urbanos. Com isso, os municípios podem

economizar grandes quantias por ano se houver um planejamento que vise otimizar as rotas de coleta de resíduos sólidos no município (Konowaleno, 2012).

Desse modo, considerando os elevados custos associados ao serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos, o presente trabalho tem como objetivo modelar a rota de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) número 10, que contempla às quadras 303 e 305 Norte, localizadas no município de Palmas, estado do Tocantins, utilizando a aplicação do Problema do Carteiro Chinês (PCC).

A coleta de resíduos sólidos consiste na passagem do caminhão por todas as vias ao menos uma vez. O caminhão sai da garagem com os coletores, dirige-se à quadra de coleta, percorre todas as vias coletando os resíduos, desloca-se até o local de destinação dos resíduos e, por fim, retorna à garagem. Esse roteiro é semelhante ao realizado pelos carteiros ao entregar correspondências. O objetivo nas rotas de coleta de resíduos ou na entrega de correspondências é encontrar o percurso mais curto possível, a fim de otimizar a distância percorrida. Esse modelo é conhecido como o Problema do Carteiro Chinês (PCC), que utiliza algoritmos de otimização para encontrar o circuito mínimo. No entanto, algumas vias acabam sendo percorridas mais de uma vez devido à disposição das ruas. Assim, o objetivo principal do PCC é minimizar a quantidade de trechos percorridos mais de uma vez.

1.1 Problema da pesquisa

A coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) desempenha um papel fundamental na organização das cidades e no bem-estar da população. Para isso, é fundamental que as atividades de coleta e transporte de RSU sejam feitas de forma regular e produtiva, garantindo a cobertura de todas as áreas de coleta e destinando os materiais ao local apropriado.

O serviço de coleta de resíduos sólidos atinge uma vasta área geográfica, o que resulta em custos significativos para a realização da coleta. Sendo assim, o serviço de coleta o item mais oneroso dentro do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Além disso, a configuração das vias, o *layout* das quadras e suas especificidades desempenham um importante papel na descrição dos custos relacionados ao serviço de coleta. Considerando o panorama apresentado, quais estratégias podem ser adotadas para otimizar as rotas de coleta de resíduos sólidos e, dessa forma, reduzir os custos associados?

1.2 Justificativa

Conforme dados fornecidos pela ABRELPE (2022), no Brasil foram gerados aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos no ano de 2022. Isso corresponde a uma média de 1,043 kg de resíduos por habitante/dia. Adicionalmente, no ano de 2021, os municípios brasileiros aplicaram recursos próximos de R\$ 28 bilhões destinados aos serviços de limpeza urbana, coleta, transporte e destinação final dos resíduos sólidos, o que representa um custo de R\$10,95 por habitante/mês.

Belien et al. (2012), destaca que a coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos é o componente mais oneroso descrito no gerenciamento de resíduos. Wu (2020), em concordância, afirma que aproximadamente 75 a 80% dos recursos são gastos com o serviço de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos. Diante deste cenário, fica evidente que a adoção de estratégias de planejamento de rotas eficientes, com o intuito de minimizar as distâncias percorridas, irá reduzir os custos envolvidos na prestação do serviço (Konowalenko, 2012).

Normalmente, as empresas encarregadas pelo serviço de coleta e transporte dos resíduos sólidos não realizam estudos para determinar os roteiros mais eficientes. Dessa forma, as rotas são definidas de forma empírica, muitas vezes por decisão arbitrária do motorista no momento da coleta.

No município de Palmas, os percursos são determinados de forma empírica, sem o uso de uma metodologia para determinar o trajeto mais eficiente. Logo, a otimização das rotas de coletas, possibilitará a redução das distâncias percorridas e do tempo de atividade, resultando na redução dos custos associados ao serviço.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Proceder um estudo de otimização de rota de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos na rota 10, composta pelas quadras 303 e 305 Norte, no município de Palmas - TO, com o objetivo de reduzir os custos relacionados a prestação do serviço.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Fazer o levantamento da rota número 10 de coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Palmas – TO;
- Analisar as ferramentas e métodos que podem ser utilizados para determinar as rotas de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos;
- Sugerir uma rota otimizada que minimizem os custos relacionados a coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos;
- Analisar e comparar os resultados obtidos por meio do Problema do Carteiro Chinês com os valores obtidos na prática.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), caracteriza os resíduos sólidos como quaisquer substâncias, objetos ou materiais descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, que se encontram em estado sólido ou semissólido (Brasil, 2010).

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos são classificados em dois grupos, perigosos e não perigosos, sendo que o último grupo é subdividido em não inerte e inerte. A classificação dos resíduos sólidos leva em consideração os riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Dessa forma, a NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos da seguinte forma:

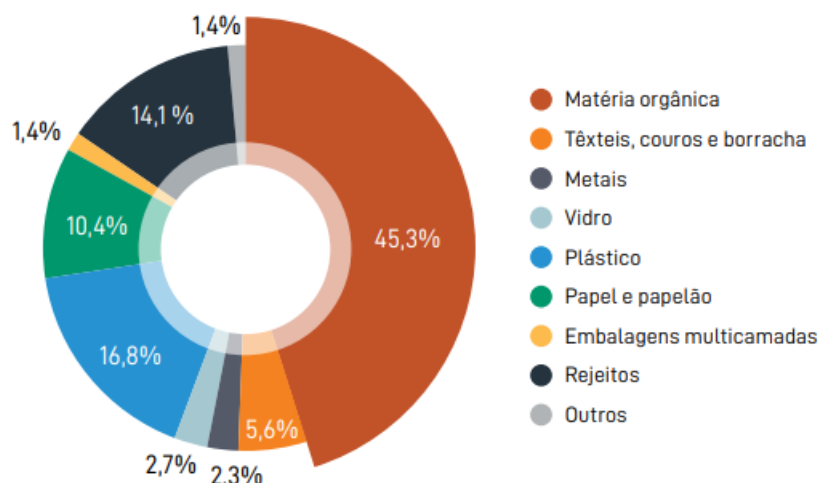
- a) **Classe I** – Perigosos, são aqueles que apresentam periculosidade ou características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- b) **Classe II** – Não perigosos, que são subdivididos em não inerte e inerte:
 - **Classe II A** – Não inerte, são aqueles que apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - **Classe II B** – Inerte, sendo aqueles que não são solúveis.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são uma categoria específica dentro do conjunto de resíduos sólidos, que se refere aos resíduos domiciliares, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas, e de limpeza urbana, advindos da varrição, limpeza de quadras e vias públicas e de serviços relacionados a limpeza urbana. A Lei 14.026 (Brasil, 2020) acrescenta, ainda, que os resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços, podem ser considerados resíduos sólidos urbanos, desde que a quantidade e qualidade seja similar aos resíduos domésticos e que os resíduos não sejam de responsabilidade de seu gerador.

Em relação a caracterização dos resíduos, um levantamento feito pela ABRELPE (2020), revelou que a fração orgânica representa como o principal

componente dos resíduos sólidos urbanos, correspondendo a 45,30% do total de resíduos coletados. Em sequência, o plástico desponta como o segundo mais coletado, com uma parcela de 16,80%, seguido pelos rejeitos, com 14,10%, enquanto o papel e papelão, que representa 10,40%, fica com a terceira maior parcela dentre os resíduos, conforme apresentado na figura 1.

Figura 01 – Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil



Fonte: ABRELPE (2020).

2.2 Sistema de Gestão dos Resíduos Sólidos

Diversos fatores podem influenciar no gerenciamento de resíduos sólidos como a localidade, estado, município e cidade, conforme observado por Rosa (2015). Mesmo em regiões com índices reduzidos de produção de resíduos, é imperativo desenvolver e implementar estratégias eficazes de gestão e otimização desses sistemas. Dessa forma, torna-se fundamental conhecer cada etapa da prestação do serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos.

2.2.1 Produção e geração de resíduos sólidos

Conforme observado por Lopes (2003), ao longo das últimas décadas, os resíduos gerados pelas sociedades tem passado por transformações. A quantidade gerada, a qualidade, o volume e a composição já não são mais as mesmas características observadas há duas décadas. Segundo o panorama apresentado pela ABRELPE (2022), cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia

no ano de 2022, somando um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Esse contexto realça a relevância de políticas públicas voltadas para a gestão eficiente de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com a cartilha de limpeza urbana do IBAM (2001), o lixo é todo e qualquer resíduo sólido proveniente de atividades humanas ou, mesmo, gerados pela natureza, como folhas e galhos de árvores. Ressalta, também, que a origem é o elemento principal na caracterização dos resíduos sólidos, classificando-os em quatro grupos:

- Lixo residencial: são os resíduos gerados nas habitações, como casas ou apartamentos;
- Lixo comercial: resíduos provenientes das atividades realizadas em estabelecimentos comerciais;
- Lixo público: é aqueles resíduos oriundos da limpeza de áreas públicas, como vias e praças, além de materiais volumosos descartados de forma indevida pela população;
- Lixo de fontes especiais: são os resíduos de características específicas, gerados, por exemplo, em hospitais, indústrias e clínicas radioativas, que necessitam de cuidados especiais para manipulação.

Não tem como pensar em limpeza urbana sem antes identificar as características dos resíduos sólidos. As características variam conforme a cidade, as atividades dominantes, a classe econômica e o comportamento da população e o clima da região IBAM (2001).

Conforme dito por Lopes (2003), à medida que aumenta a quantidade de lixo gerada por uma cidade, ainda maiores serão os gastos com ele. Portanto, uma das estratégias para que municípios consigam reduzir seus custos com a gestão é incentivar a redução da geração de resíduos. Entretanto, antes de se preocupar em reduzir a produção, é crucial implementar ações voltadas para prevenir a geração de RSU.

2.2.2 Acondicionamento

A responsabilidade pelo acondicionamento e armazenamento de resíduos sólidos, assim como a sua disponibilização para a coleta, recai sobre os geradores.

Vale ressaltar que, do ponto de vista sanitário e da eficiência na coleta, acondicionar os resíduos sólidos em sacos plásticos é o ideal. No entanto, os sacos plásticos apresentam fragilidade em relação a materiais perfuráveis e cortantes, além de representar um custo elevado, o que pode levar a população de baixa renda a adotar alternativas menos adequadas (FUNASA, 2019).

Segundo a cartilha de limpeza urbana do IBAM (2001), a escolha adequada do tipo de recipiente para armazenar os resíduos requer a consideração de alguns fatores. Dentre os fatores a serem considerados estão: as características dos resíduos, a sua fonte geradora, a frequência de coleta na região, o tipo de habitação e o custo do recipiente.

De Sousa Xavier (2010) acrescenta que o recipiente apropriado para armazenar os resíduos deve atender os critérios sanitários, não apresentar aspecto repulsivo ou desagradável, possuir capacidade suficiente de armazenar os resíduos entre os intervalos de coleta e possibilitar uma coleta rápida e eficiente, além de propiciar segurança para toda a equipe durante a manipulação.

2.3 Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com Lima (2012), a operação de coleta de resíduos sólidos abrange todo o processo desde a saída do veículo da sede da empresa, compreendendo todo o trajeto percorrido para a coleta dos resíduos dos locais onde foram acondicionados, o transporte até os locais de descargas e o seu retorno a ponto de partida.

Conforme o panorama apresentado pela ABRELPE (2022), o país registrou um total de 76,1 milhões de toneladas coletadas no ano de 2022, isso corresponde a uma cobertura de coleta de 93%.

Normalmente, a coleta dos resíduos pode ser categorizada em dois tipos de sistemas: o sistema especial de coleta, utilizado para coletar resíduos que requerem cuidados especiais, como os resíduos contaminados, e o sistema de coleta de resíduos não contaminados, sistema empregado, por exemplo, na coleta de resíduos sólidos urbanos (Lima, 2022).

Independentemente do sistema adotado para a coleta dos resíduos, é incontestável que estes precisam ser transportados do ponto de coleta até um local de disposição final apropriado.

2.3.1 Transporte

Os veículos empregados na coleta e transporte dos resíduos são os mais diversos, sendo encontrado no mercado várias alternativas. Conforme observado por Lima (2022), no Brasil, a escolha do veículo de coleta e transporte dos resíduos ainda é feita de forma bastante empírica. Nesse sentido, a NBR 12980 estabelece as especificações necessárias para a escolha dos veículos utilizados no processo de coleta e transporte dos resíduos sólidos até o local de destinação final.

Dentre os veículos geralmente recomendados para o serviço de coleta e transporte de resíduos, destacam-se os caminhões com carrocerias sem compactação e/ou com carrocerias compactadoras.

Os veículos com carrocerias sem compactação mais utilizados na limpeza urbana são os do tipo: basculante convencional (Figura 02) e baú ou prefeitura (Figura 03) (IBAM, 2001). O primeiro tipo tem como vantagem a possibilidade de utilizar o veículo em outros serviços. No entanto, a desvantagem é que as carrocerias basculantes são abertas, o que propicia a dispersão de resíduos pelas ruas devido à ação do vento, além de não proporcionar uma ergonomia adequada para os trabalhadores responsáveis pela coleta. Por outro lado, os veículos do tipo baú ou prefeitura tem como vantagem a característica de serem fechados, o que possibilita um melhor acondicionamento dos resíduos e evita sua dispersão pelas ruas. Contudo, a desvantagem é que, por ser fechado, dificulta a arrumação dos resíduos pelos profissionais no interior da carroceria (IBAM, 2001).

Figura 02 – Caminhão com carroceria do tipo basculante convencional



Fonte: Prefeitura de Guaraí/TO (2021).

Figura 03 – Caminhão com carroceria do tipo baú ou prefeitura



Fonte: Prefeitura de Angra dos Reis/RJ (2021).

Dentre a variedade de modelos de veículos, os caminhões equipados com carrocerias compactadoras (Figura 04) são os mais utilizados (IBAM, 2001). O emprego desse tipo de veículo oferece diversas vantagens como a capacidade de transportar uma quantidade superior de resíduos quando comparado aos veículos sem compactação, proporciona condições ergonômicas mais seguras aos trabalhadores, além de propiciar agilidade no processo de descarga.

Entretanto, esse modelo também apresenta desvantagens. Uma delas é o custo elevado associado a aquisição e manutenção do equipamento, o que pode tornar seu uso menos viável em cidades com baixa densidade populacional, além de necessitar de mão de obra qualificada para atender as complicadas manutenções do equipamento.

Figura 04 – Caminhão com carroceria compactadora.



Fonte: Prefeitura de Palmas/TO (2019).

2.3.2 Disposição final

A disposição final é a última etapa dentro do processo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Por mais que exista diferentes métodos para a destinação final dos resíduos sólidos, no Brasil, o método mais comum é aquele que consiste na disposição dos resíduos no solo, seja em lixões, aterros controlados ou aterros sanitários (Pinheiro e Ferreira, 2017).

Conforme indicado pela FUNASA (2019) por meio do Manual de Saneamento, a utilização de aterro sanitário, quando tecnicamente executado, na perspectiva sanitária, representa a maneira mais adequada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos. A adoção desse método minimiza os riscos de poluição dos recursos hídricos sejam eles superficiais ou subterrâneos.

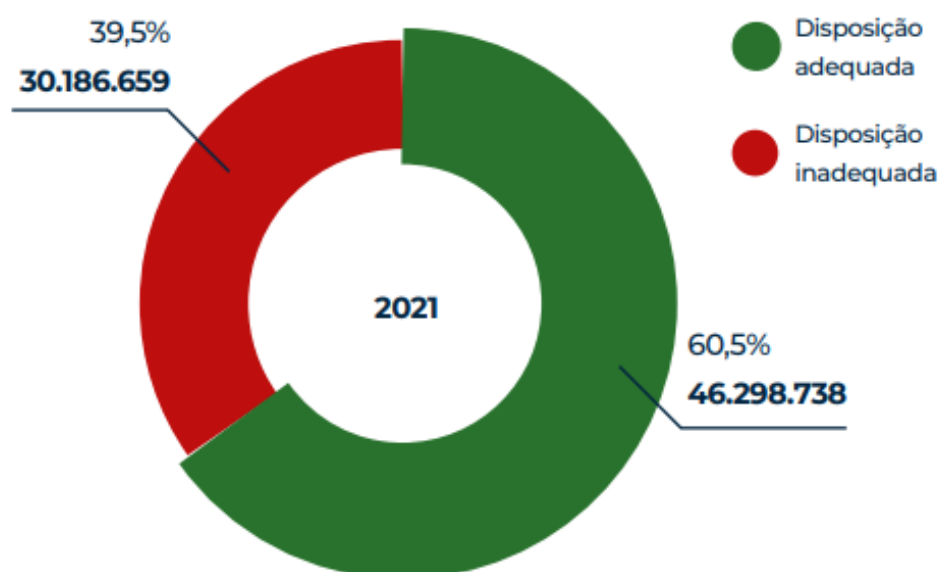
Figura 05 – Foto aérea do aterro sanitário de Brasília/DF



Fonte: Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal - SLU (2021).

Segundo dados da ABRELPE (2022), a maior parte dos resíduos sólidos urbanos coletado no Brasil tem como destinação final os aterros sanitários, uma parcela de 60,5% do total de resíduos coletados. Em contrapartida, a utilização de lixões e aterros controlados como forma de destinação final dos resíduos ainda é uma realidade de muitos municípios brasileiros e receberam o correspondente a 39,5% dos resíduos coletados.

Figura 06 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil
(t/ano e %)



Fonte: ABRELPE (2022).

2.4 Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Palmas

2.4.1 Caracterização do município de Palmas

Fundado em 20 de maio de 1989, o Município de Palmas é a capital do Estado de Tocantins. Sendo também a Capital mais nova do Brasil.

O município conta com uma extensão territorial de 2.227,329 km², sendo que 104,46 km² é de área urbanizada e, segundo dados do IBGE, a cidade de Palmas conta com 302.692 habitantes (IBGE, 2022).

2.4.2 Gerenciamento integrado dos RSU no município de Palmas

Conforme a CEMPRE (2018), o gerenciamento integrado dos resíduos sólidos constitui um conjunto coordenado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento essenciais para que uma administração garanta os serviços de coleta, segregação, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos no município.

Ainda, seguindo os pontos propostos pela CEMPRE (2018), o gerenciamento dos resíduos sólidos implica assegurar a limpeza do município mediante um sistema de coleta e transporte eficiente e apropriado, garantir a destinação correta e segura dos resíduos sólidos, e reconhecer que todas as ações e operações envolvidas no gerenciamento são associadas. Isso ressalta a necessidade de conceber um modelo de gerenciamento adequado para o município, com o objetivo de garantir a fluidez adequada e minimizar possíveis falhas nos processos de gerenciamento.

2.4.2.1 Produção e geração dos resíduos sólidos

Conforme já foi mencionado, o panorama apresentado pela ABRELPE (2022), diz que cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia no ano de 2022, somando um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos.

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2010 o município de Palmas gerou 65.727 toneladas de resíduos sólidos, já em 2021, passados 10 anos, o município de Palmas gerou 172.568 toneladas de

resíduos sólidos urbanos, o que representa um aumento de aproximadamente três vezes mais.

Conforme detalhado no Quadro 01, a geração per capita de resíduos sólidos no município de Palmas, em 2010, foi de 0,90 kg/hab.dia, sendo que mais de dez anos depois a quantidade de resíduos alcançou a quantia de 1,55 kg/hab.dia em 2021, representando um aumento significativo ao longo dos anos. Destaca-se que nos últimos anos, a geração per capita de RSU no município de Palmas tem superado a média nacional, que foi de 1,043 kg/hab.dia em 2022, conforme dados apresentados pela ABRELPE (2022).

Quadro 01 – Série histórica dos RSU coletados em Palmas/TO.

Ano	Resíduos Sólidos Urbanos - RSU (ton/ano)	População (hab)	Geração Per Capita (Kg/hab.dia)
2021	172.568,00	304.305	1,55
2020	181.338,60	297.456	1,67
2019	106.258,00	290.494	1,00
2018	85.214,80	283.432	0,82
2017	81.292,40	278.510	0,80
2015	80.064,00	264.855	0,83
2014	88.553,60	252.594	0,96
2013	74.514,70	250.461	0,82
2012	68.764,30	235.084	0,80
2011	73.882,10	205.672	0,98
2010	65.727,10	199.568	0,90

Fonte: SNIS, adaptado pelo autor (2024).

De acordo com o ensaio de composição gravimétrica realizado pela empresa Líder Engenharia e Gestão de Cidades (2022), para a elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS (2023), os resíduos sólidos urbanos em Palmas apresentam os resíduos orgânicos como a maior fração, representando 45,87%. Em seguida, tem o papel/papelão, com 13,85%, seguido dos rejeitos (13,69%), plásticos (11,65%), metal (6,27%), vidro (5,91%), isopor (1,74%) e

os resíduos de serviços de saúde (1,02%). A caracterização da composição gravimétrica é representada pela Figura 07 a seguir:

Figura 07 – Composição gravimétrica dos RSU de Palmas



Fonte: PMGIRS (2023).

Observa-se que esses valores se aproximam da média nacional apresentada pelo panorama da ABRELPE (2020), no qual os resíduos de matéria orgânica correspondem a 45,30%, representando também a maior fração dentre os resíduos sólidos urbanos coletados.

2.4.2.2 Acondicionamento

O correto acondicionamento dos resíduos deve ser feito com embalagens que demonstrem bom desempenho sanitário, a fim de atender aos requisitos de acondicionamento local e estático do lixo (CEMPRE, 2020). Entretanto, apesar de ser possível definir tecnicamente o tipo de acondicionamento mais apropriado para cada situação, sua padronização é muito difícil, isso porque a responsabilidade de acondicionar é do usuário e isso depende de vários fatores, como por exemplo, a condição social de cada usuário (IBAM, 2020).

No município de Palmas, assim como em outras cidades de porte similar, as formas de acondicionamento e apresentação para coleta são diversas. Contudo, em sua maioria, os resíduos são acondicionados em sacos plásticos pretos, específicos

para lixo, ou em sacolas plásticas, as tradicionais sacolas de supermercado. Além disso, a apresentação para coleta ocorre em sua maior parte em acondicionadores específicos para esse propósito, ou mesmo diretamente no solo, conforme apresentado na Figura 8 (PMGIRS, 2023).

Figura 08 – A figura a esquerda apresenta um armazenamento temporário inadequado enquanto a figura a direita apresenta um acondicionamento adequado, porém, disposto em local inadequado



Fonte: PMGIRS (2023).

Ainda, em localidades com aglomerações comerciais e em regiões onde o serviço de coleta não é realizado porta a porta, há a presença de caçambas estacionárias, nas quais o usuário pode realizar a entrega voluntária dos resíduos gerados em seu estabelecimento ou residência.

Figura 09 – Caçambas estacionárias para depósito voluntário de RSU



Fonte: PMGIRS (2023).

2.4.2.3 Coleta de resíduos sólidos

A coleta e o transporte de RSU são atividades essenciais para a saúde pública e a qualidade de vida da população. Um planejamento adequado é crucial para garantir a eficácia e a regularidade desse serviço, incluindo a definição de rotas, frequências de coleta, tipos e quantidade de veículos, equipes e horários. Um sistema de coleta bem planejado e gerenciado contribui significativamente para a redução de doenças relacionadas ao lixo e para a manutenção da ordem pública. Além disso, uma coleta eficiente e regular é fundamental para minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada dos resíduos.

A coleta dos resíduos sólidos urbanos de uma cidade deve ser realizada de forma abrangente, atendendo a toda a população. O lixo não coletado pode causar problemas sanitários, como a proliferação de vetores de doenças, que podem afetar não apenas a população das proximidades, mas também a saúde pública da cidade (IBAM, 2001).

Segundo dados apresentados pelo SNIS (2023), no ano de 2021, o município de Palmas teve uma taxa de cobertura de 100% da população com o serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos.

O serviço de coleta no município é de responsabilidade da Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos – SEISP, sendo a execução do serviço atribuída à empresa terceirizada MB Limpeza Urbana, especializada na área.

Quanto a frequência da coleta dos resíduos sólidos, na maioria dos setores a coleta é realizada três vezes por semana, inclusive nos distritos de Taquaruçu e Buritirana. Já nos centros comerciais e zonas de grande fluxo, a coleta é realizada diariamente (PMGIRS, 2023).

2.4.2.4 Transporte

Como mencionado anteriormente, a execução do serviço de coleta dos resíduos sólidos no município de Palmas fica a cargo da empresa terceirizada MB Limpeza Urbana. Conforme orienta cartilha de limpeza urbana no IBAM (2001), diversos são os tipos de veículos e equipamentos coletores que podem ser empregados no serviço de coleta, sendo a escolha adequada para garantir o atendimento em todas as áreas onde o serviço é prestado.

Para realizar a coleta no município, a empresa MB Limpeza Urbana conta com 14 caminhões equipados com carrocerias compactadoras e mais 7 caminhões com carroceria do tipo basculante. Adicionalmente, a empresa conta com 2 motos com carretinha, onde são utilizadas para realizar a coleta em localidades de difícil acesso. Ainda, a equipe de coleta para cada caminhão é composta de 1 motorista e 3 coletores (PMGIRS, 2023).

2.4.2.5 Disposição final dos RSU no município de Palmas

A ABNT NBR 8419/1992 define aterro sanitário como um local que emprega a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem provocar significativos impactos ambientais ao meio ambiente e a saúde pública.

Conforme indicado pela FUNASA (2019) por meio do Manual de Saneamento, a utilização de aterro sanitário, na perspectiva sanitária, representa a maneira mais adequada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos.

Dessa forma, o município de Palmas dispõe de um Aterro Sanitário Municipal (Figura 10), criado em 21 de novembro de 2001, situado nas proximidades do Assentamento São João. A área do aterro sanitário abrange 92,914 hectares, com uma vida útil estimada de 40 anos, e a previsão é de sua utilização para disposição final de resíduos até 2042 (PMGIRS, 2023).

Figura 10 – Células finalizadas do Aterro Sanitário Municipal de Palmas



Fonte: PMGIRS (2023).

2.4.3 Custos com coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos em Palmas

Segundo dados disponibilizados pelo SNIS (2022), o Sistema de Limpeza Pública e Manejo de Resíduos Sólidos de Palmas teve, em 2022, uma despesa total de R\$ 47.773.051,59. Sendo que desse total, R\$ 6.500.000,00 foram gastos pelo próprio agente público e R\$ 41.273.051,59 foram destinados a empresa terceirizada para a prestação do serviço. Com isso, a despesa total anual, representa para o município de Palmas, um custo de R\$ 157,83 por habitante.

Conforme dados extraídos do SINIR (2019), no ano de 2019, o município de Palmas teve um custo total de R\$32.243.4510,08 com o serviço de limpeza urbana. Desse total, 47,89% foram gastos somente com o serviço de coleta de RSU, conforme detalhado na Figura 11.

Figura 11 – Custos anuais com o serviço de limpeza urbana de Palmas

Serviço	Custo (R\$)	Proporção (%)	Custo por Tonelada (R\$/t)
Coleta de RSU indiferenciada e seletiva	15.442.107,04	47,89	143,63
Coleta de RSS	167.820,12	0,52	829,15
Varrição	6.671.941,03	20,69	-
Demais serviços, inclusive administrativos e com unidade de processamento	9.961.582,89	30,89	92,66
Total	32.243.451,08	100,00	1.065,44

Fonte: SINIR (2019).

2.5 Otimização de Roteiros de Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

O planejamento constitui uma etapa crucial para as tomadas de decisões no serviço de coleta dos resíduos sólidos urbanos. Um plano de coleta eficaz é essencial para minimizar os custos associados ao serviço. Durante a elaboração do plano, deve ser definido a região de coleta, a frequência de coleta, o tipo de veículo que será utilizado, a capacidade do veículo, além da distância a ser percorrida e o tempo que irá durar a rota de coleta. Para isso, faz-se necessária a utilização de métodos que permitam determinar a melhor rota de coleta dos resíduos sólidos.

Segundo o IBAM (2021), os roteiros ou itinerários de coleta são definidos de forma que o serviço se torne o mais eficiente possível, assegurando a cobertura de todas as áreas de coleta. Ainda, segundo Xavier (2010) um planejamento ineficiente pode trazer resultados prejudiciais em relação aos custos e a qualidade do serviço prestado a sociedade.

Diante disso, a busca pela otimização dos roteiros de coleta visa a redução dos custos associados ao serviço de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos, reforçando a importância de um planejamento preciso e eficaz.

2.5.1 Modelagem do Problema de Coleta dos Resíduos Sólidos Urbanos

A modelagem de rotas para coleta de resíduos sólidos representa um desafio, pois demanda conhecimento aprofundado das ferramentas e métodos disponíveis. Conforme apontado por Melquides (2015), a modelagem matemática surge como uma alternativa viável para representar situações reais, que podem ajudar no processo de tomada de decisões por meio da simulação de processos e de cenários. Nesse contexto, é essencial compreender as teorias que abordam o problema das rotas, bem como os algoritmos de otimização, no intuito de selecionar a abordagem mais apropriada para situação específica.

Dentre as ferramentas disponíveis para abordar o problema de roteamento, destaca-se a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), no inglês *Geographic Information System* (GIS). O SIG possibilita a análise espacial das informações e a representação visual dos dados por meio de mapas. No roteamento, sua utilidade se evidencia na identificação das áreas de coleta, no levantamento das distâncias a serem percorridas, na análise do tráfego na região e na identificação de áreas com maior demanda de coleta (Rizvanoglu et al., 2020).

Lunes (2020) conduziu uma análise do atual roteiro de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos no município de Pau dos Ferros, localizado no estado do Rio Grande do Norte, utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). O emprego do SIG consistiu em processar e manipular dados, caracterizar e mapear as rotas de coleta, além de determinar os custos variáveis de transporte.

Através dessa abordagem, Lunes identificou ineficiências no programa de manutenção dos veículos, na quantidade de veículos disponíveis e constatou a idade avançada da frota, além da ausência de monitoramento operacional e ineficiência no

planejamento de rotas de coleta. Como resultado, Lunes destacou que a utilização de SIGs gerou a possibilidade de redução das distâncias percorridas, o que pode resultar em uma economia de até 54,15% nos custos de combustível mensais.

Detofeno e Steiner (2009) combinou a heurística de Teitz e Bart para a obtenção da p-mediana necessária para o problema. Após definir as p-medianas, os grupos de pontos foram determinados por meio do algoritmo adaptado de Gillet e Jonhson. Para obtenção do roteamento de cada grupo de atendimento, foi utilizado o algoritmo do carteiro chinês. Assim, ao aplicar os procedimentos de otimização, Detofeno e Steiner conseguiram alcançar uma redução de 8,6% no percurso total gasto diariamente em uma rota.

Xavier (2010) utilizou a técnica de programação linear associada a métodos heurísticos no intuito de minimizar o consumo de combustível relacionado ao serviço de coleta de resíduos. O modelo consistiu em validar um conjunto de problemas-teste e depois aplicar em um dos distritos urbanos de Montes Claros, Minas Gerais. Comparando os valores obtidos por meio do modelo com os praticados, Xavier obteve uma redução de 5% no consumo de combustível, o que representa um valor bastante significativo para o município.

Oliveira (2016) utilizou o método do Problema do Carteiro Chinês (PCC) com o objetivo de otimizar uma rota de coleta de resíduos no município de Pombal, na Paraíba. Para encontrar a melhor rota de coleta, Oliveira utilizou o programa XNÊS para a criação dos grafos e determinação do comprimento dos percursos realizados. Ao comparar os resultados obtidos, Oliveira identificou que no atual roteiro praticado, o caminhão cobria apenas 66,68% das ruas, o que fazia com que os garis percorressem o restante do percurso a pé. Em contrapartida, a rota otimizada permite o caminhão percorrer 100% das vias, o que resulta em economia de tempo e eficiência do serviço.

Kripka *et al.* (2009) elaboraram um estudo visando a otimização da coleta porta a porta no município de Marau, no Rio Grande do Sul. A otimização da coleta tem como objetivo subsidiar a Prefeitura Municipal de Marau no planejamento relativo à coleta e destinação dos resíduos sólidos, buscando a redução dos custos associados ao serviço de coleta de RSU. Utilizando o método do Problema do Carteiro Chinês, a formulação do problema foi implementada com o emprego da heurística do Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), já empregada com êxito pelos autores em outros estudos. Com isso, foram determinados os trechos que seriam percorridos

mais de uma vez pelo caminhão de coleta, visando a forma mais eficiente possível, determinaram que seria necessário um acréscimo de 32,55% no comprimento total das ruas.

Com isso, baseado nos dados apresentados, fica evidente que a aplicação de métodos para otimização de rotas é essencial para melhorar a eficiência da prestação dos serviços e reduzir os custos associados. A aplicação de métodos matemáticos, associados a tecnologia, demonstraram ser possível reduzir as distâncias percorridas e conseqüentemente, a redução dos custos na prestação do serviço de coleta.

2.5.2 Teoria dos Grafos

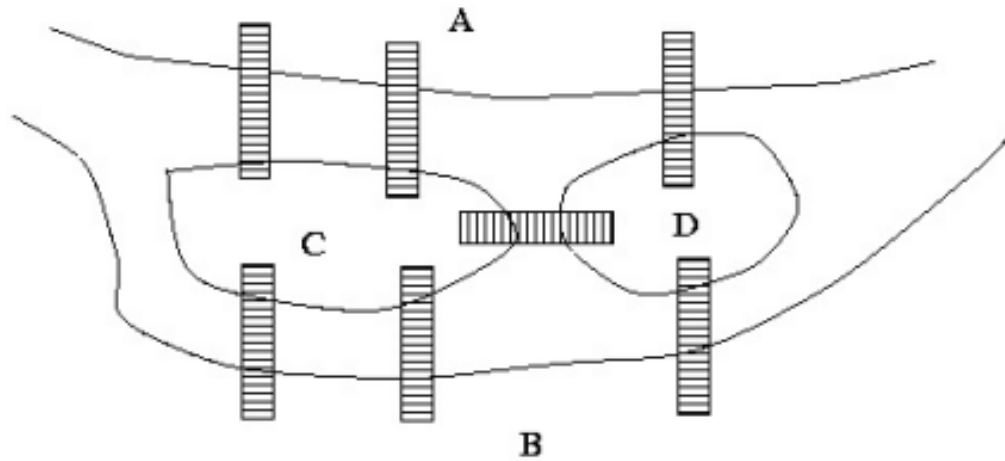
A aplicação de ferramentas matemáticas na roteirização pode proporcionar diversos benefícios, como a redução dos custos, otimização do tempo de coleta e melhoria na qualidade do serviço.

O processo de otimização de roteiros se beneficia do uso de diversas ferramentas matemáticas, oferecendo soluções para problemas complexos. Dentre essas ferramentas, alguns métodos podem ser aplicados de forma manual, enquanto outros utilizam de programas computacionais com base em princípios matemáticos avançados, como algoritmos genéticos, heurísticas, programação linear e teoria dos grafos. Tais programas são capazes de resolver problemas complexos de forma eficiente, o que pode resultando em uma significativa otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos.

Para a compreensão da resolução do problema, é essencial entender a definição de elementos-chave, como vértice (ou nós) e arestas, que constituem o conjunto de objetos formadores dos grafos. Essa estrutura é empregada na elaboração dos roteiros de coleta de resíduos sólidos urbanos através da aplicação do Problema do Carteiro Chinês.

Em 1736, o matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) iniciou a Teoria dos Grafos ao resolver o problema das sete pontes de Königsberg. Para compreender melhor esse problema, é relevante explorar seus detalhes, pois se assemelha com a roteirização de coleta de resíduos sólidos. Königsberg, era uma pequena cidade na antiga Prússia. A cidade possuía sete pontes conectando diversas partes, cortadas por vertentes do rio Pregel, resultando na formação de duas ilhas ao centro, como ilustrado na Figura 11 (Vulcani, 2015).

Figura 12 – A cidade de Königsberg tinha quatro partes, onde as ilhas C e D eram ligadas por sete pontes às margens A e B

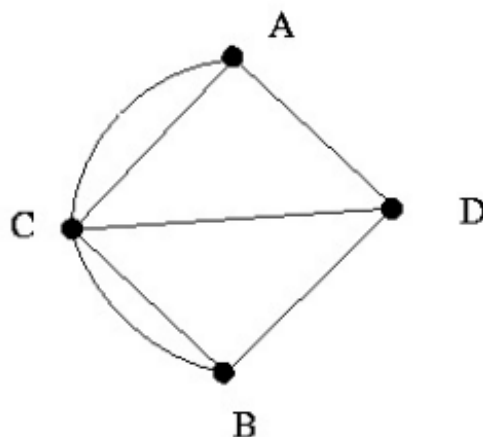


Fonte: Vulcani (2015).

Assim, os habitantes dessa cidade indagavam se seria possível, partindo de um ponto, percorrer todas as pontes sem passar mais de uma vez por qualquer uma delas e retornar ao ponto de partida. Dessa forma, Euler dedicou-se em solucionar o problema, para isso simplificou o plano retirando os elementos desnecessários e considerou as margens e as ilhas como pontos A, B, C e D, enquanto as pontes foram consideradas como arcos conectando esses pontos (Vulcani, 2015).

A Figura 13, ilustra o que vem a ser, provavelmente, o primeiro exemplo de um grafo. Euler, ligou os arcos (as pontes) conectando os pontos (margens e ilhas) e concluiu que não era possível percorrer todo o trajeto sem repetir um dos pontos, o que resultou no diagrama a seguir:

Figura 13 – Esquema de Euler para as pontes de Königsberg



Fonte: Vulcani (2015).

2.5.3 Problema do Carteiro Chinês

Em 1962, mais de 200 anos após Euler descrever sua solução para o problema de Königsberg, o matemático chinês Meigu Guan publicou seu estudo que generalizou os grafos eulerianos. O problema estudado por Guan ficou conhecido como o Problema do Carteiro Chinês (PCC) (Oliveira, 2020).

O PCC é um problema matemático clássico que consiste em encontrar o caminho mais curto que o carteiro deve percorrer para entregar todas as correspondências, passando por todas as ruas pelo menos uma vez e retornando ao ponto de início. Assim, a complexidade desse problema reside na dificuldade de encontrar uma solução ótima em tempo razoável, especialmente quando a cidade possui muitas ruas ou quando estas têm direções distintas (Lima, 2023).

Konowalenko (2012) defini o PCC como um problema que objetiva cobrir todos os arcos de um grafo com a rota de menor distância a ser percorrida. Acrescenta, ainda, que o PCC se distingue do circuito euleriano por permitir a repetição de arestas quando necessário. O PCC pode ser aplicado a grafos não-direcionados (são vias de mão dupla), direcionados (vias de mão simples) ou mistos (vias de mão dupla e vias de mão simples).

O Problema do Carteiro Chinês possui várias aplicações em diversas áreas, como por exemplo, pode ser utilizado para otimizar distâncias percorridas por carteiros ou roteiros de coleta de resíduos sólidos urbanos.

Moro (2014) classifica as três principais abordagens do PCC:

a) Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado (PCCND):

A solução do problema do carteiro chinês em grafos não orientados e Eulerianos é a determinação do circuito Euleriano. Um circuito Euleriano é um caminho que passa por todas as arestas de um grafo não orientado exatamente uma vez. Um grafo conexo G é Euleriano quando cada vértice tem um número par de arestas incidentes (Goldarg, 2005).

O PCCND é um problema que consiste em encontrar um percurso de custo mínimo em um grafo valorado e conexo, a partir de um vértice origem. Um exemplo para sua aplicação são cidades somente com ruas de mão dupla (Moro, 2014).

No caso de grafos não direcionados, podemos formular o problema conforme a Equação 1:

Equação 1 – Formulação do Problema do Carteiro Chinês

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0 \quad i = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall (i, j) \in A$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro}$$

Onde:

x_{ij} – número de vezes em que a aresta (i, j) é percorrida de i para j ;

c_{ij} – comprimento ou custo da aresta (i, j) .

b) Problema do Carteiro Chinês Direcionado (PCCD):

O PCCD é um problema que consiste em encontrar o caminho mais curto que percorre todas as arestas de um grafo fortemente conexo, começando no vértice de origem e terminando no vértice de destino. Um grafo fortemente conexo é um grafo em que cada vértice é alcançável a partir de qualquer outro vértice (Moro, 2014).

Diferentemente dos grafos não direcionados, o PCCD requer que o grafo seja fortemente conexo. Dessa forma, o objetivo é encontrar o caminho mais curto que percorre todas as arestas do grafo, começando no vértice de origem e terminando no vértice de destino (Moro, 2014).

Um exemplo de aplicação do PCCD são cidades somente com ruas de mão única. Nesse caso, o carteiro precisa percorrer todas as ruas da cidade, passando por cada rua apenas uma vez e retornando ao ponto de origem.

c) Problema do Carteiro Chinês Misto (PCCM):

Em redes mistas, o grafo também precisa ser totalmente conectado para que o PCC tenha solução. A condição para que uma rede mista seja Euleriana é que esta rede seja par e balanceada. Uma rede par é aquela quando o número total de arcos é par. Já uma rede balanceada é aquela na qual, para todo nó genérico, a diferença entre o número de arcos que saem deste nó e que entram neste nó é igual ou menor ao número de arcos que ligam este nó genérico a qualquer nó (Moro, 2014).

O PCCM é um problema que consiste em encontrar o caminho mais curto que percorre todas as arestas de um grafo misto fortemente conexo, começando no vértice

de origem e terminando no vértice de destino. Um exemplo de aplicação do PCCM são cidades com ruas de mão dupla e mão única (Moro, 2014).

2.5.3.1 Algoritmo de Dijkstra

Segundo Coto (2003), o algoritmo de Dijkstra é uma técnica utilizada para determinar o caminho mais curto partindo de um nó e percorrendo todos os outros nós de um grafo ponderado, tanto ele sendo direcionado ou não. O algoritmo de Dijkstra foi desenvolvido pelo cientista da computação Edsger Dijkstra, no ano de 1956. De acordo com Barros *et al.* (2007), o número de vértices presentes no grafo vai determinar a eficiência do algoritmo.

O algoritmo de Dijkstra inicia atribuindo distâncias infinitas a todos os nós em relação ao nó de partida, exceto para o próprio nó de partida, que tem sua distância estabelecida como zero. O processo envolve a criação de um conjunto "visitados" para armazenar nós com distâncias mínimas determinadas. Em seguida o algoritmo escolhe o nó com a menor distância não visitada, marcando-o como visitado. Para cada vizinho do nó atual, calcula-se uma distância tentativa, somando a distância atual ao vizinho com a distância acumulada do nó atual até a origem. Se a distância tentativa for menor que a distância atual armazenada para o vizinho, a distância armazenada é atualizada (Lima, 2022).

O algoritmo continua esse processo até que o nó de destino seja visitado ou não haja mais nós alcançáveis a partir do nó de partida. Após a execução, o algoritmo encontra a rota ótima do nó de partida para todos os outros nós no grafo, bem como o menor caminho correspondente para alcançar cada nó (Lima, 2022).

3. METODOLOGIA

Este estudo teve como objetivo analisar uma rota de coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Palmas, localizado no estado do Tocantins, com foco específico na rota de número 10, composta pelas quadras 303 e 305 Norte. A técnica de pesquisa adotada consiste na execução de atividades em campo, onde foi realizado o acompanhamento do veículo de coleta desde sua saída da garagem até o retorno ao seu ponto de partida, abrangendo todas as vias correspondentes a rota de coleta de resíduos sólidos.

Durante o levantamento em campo, buscou-se detalhar de forma precisa todo o percurso realizado pelo veículo de coleta. Esse procedimento permitiu a construção e mapeamento do real percurso realizado na rota de coleta de resíduos em questão.

Em seguida, com o mapeamento das quadras 303 e 305 Norte feito, foi realizado o lançamento dos dados no algoritmo, utilizando o Problema do Carteiro Chinês, para processamento e obtenção da rota ótima de coleta.

Posteriormente, os dados levantados em campo foram submetidos a uma análise comparativa com a rota determinada por meio da aplicação do Problema do Carteiro Chinês. Essa abordagem matemática permitiu identificar possíveis otimizações na rota de coleta, onde resultou na redução da distância total percorrida pelo veículo. Dessa forma, a otimização pode representar uma economia de tempo, como também pode contribuir para a redução dos custos relacionados ao serviço de coleta de resíduos, proporcionando benefícios tanto econômicos quanto ambientais.

Por fim, realizou-se um levantamento, com custos representativos, das despesas mensais relacionadas ao veículo de coleta. Com isso, baseado nos custos descritos, foi possível obter a economia ao longo de um ano, resultante da redução da distância total percorrida pelo veículo de coleta.

3.1 Área de Estudo

Instituído em 20 de maio de 1989, o Município de Palmas é a capital do Estado do Tocantins. Segundo dados do IBGE, Palmas localiza-se na região central do Tocantins.

O município conta com uma extensão territorial de 2.227,329 km², sendo que 104,46 km² é de área urbanizada e, segundo dados do IBGE, a cidade de Palmas conta com 302.692 habitantes (IBGE, 2022).

As quadras urbanas 303 e 305 Norte, objeto de estudo deste trabalho, ficam localizadas na região do Plano Diretor Norte, mais precisamente na região Noroeste de Palmas.

Figura 14 – Indicação da localização do município de Palmas



Fonte: PMSB (2013).

3.2 Rotas de Coleta

A definição das rotas para a coleta de resíduos deve ser cuidadosamente planejada e mapeada, com pontos de entrada e saída das quadras claramente definidos e todo o trajeto previamente estabelecido. Essa abordagem permite a criação de uma rota otimizada, focada na eficiência e eficácia do processo de coleta de RSU. As quadras 303 e 305 Norte estão inseridas nas coletas das segundas-feiras, quartas-feiras e sextas-feiras, representando uma frequência de três vezes na semana. No Quadro 02 é apresentada a programação com os dias, frequência e localidades que acontecem as coletas no município de Palmas/TO.

Quadro 02 – Programação da coleta de RSU em Palmas

DIAS E FREQUÊNCIA DE COLETA	LOCALIDADES
Segunda-feira a sábado	ACSU-SO 10, ACSU-SE 10, ACNO 1 e 11, ACNO 1 e 11, ACNE 1 e 11, ACSE 1 e 11, ACSU-SO 20, ACSU-SE 2, Arse 2, Av. Palmas Brasil, Av. Teotônio Segurado (adjacentes), Av. JK (da TO-050 ao Palácio Araguaia), Av. LO-05 (NS-08 a Av. T. Segurado), Av. LO-27, Av. Teotônio Segurado (LO-05 a LO-04), Terminal Rodoviário de Palmas e secretarias da Praça dos Girassóis.
De segunda-feira a domingo	Av. I no Jardim Aurenny III, Av. Tocantins no Jardim Aurenny I, Av. Tocantins (Taquaralto) e Feiras
Todas as quartas-feiras e domingos	Setor Sonho Meu
Todas as quartas-feiras, sextas-feiras e domingos	Nas marginais da TO-010 (sentido Palmas-Lajeado) até o Km 31; na TO-020 (sentido Palmas-Taquaruçu Grande) até o Km 32.
Todas as segundas-feiras, quartas-feiras e sextas-feiras	ACSO 101, Arso 102, Arso 103, Arso 12, Arne 12, Arse 12 (106 Sul), Arne 13, Arne 14, Arse 15, Arso 111, Arso 112, ASR-SE 15, Arso 121, Arse 121, Arse 131, Arse 132, Arse 141, Arse 142, Arso 151, Arso 21, Arse 21, Arso 22, Arse 22, Arno 23, Arso 23, Arne 24, Arse 23, Arse 24, ASR-NE 25, ASR-SE 25, Arno 31, Arso 31, Arne 41, Arno 32, Arso 32, Arse 32, Arno 33, Arso 33, Arse 33, Arso 34, Arso 41, Arno 41, Arne 51, Arno 42, Arso 42, Arne 53, Arno 43, Arso 43, Arne 54, Arno 44, Arso 44, , Arso 45, ASR-NE 55, Arno 61, Arne 61, Arse 51, Arne 63, Arso 53, Arne 64, Arso 54, Arno 71, Arso 61, Arne 71, Arno 72, Arso 62, Arne 74, Arse 72, Arno 73, Arso 63, Arno 42, Av. LO-27, Av. Tocantins (Taquaralto), Água Fria, Clube da Caixa e BB, Ecológico, Feira 1206 Sul, Feira da 304 Sul, Garagem do Estado, NS-10 desde a LO-04 até a Embrapa, Praia da Graciosa, Palacinho, Polinésia, Praia das Arnos, Praia do Prata, Santo Amaro, das Secretarias até o Detran, Setor Lago Norte, TO-010 até Km 28,

	TO-050 da LO-19 ao Dertins, UFT, Vila Militar Exército e Marinha.
Todas as terças-feiras, quintas-feiras e sábados	Arse 101, ASR- SE 105, Arse 111, Arse 112, ASR-SE 115, Arse 122, Arse 61, ASR-SE 65, Arse 71, Arse 72, ASR-SE 75, Arse 81, Arse 82, ASR-SE 85, Arse 91, Arse 92, ASR-SE 95, Jardim Aurenny I, Jardim Aurenny II, Jardim Aurenny III, Jardim Aurenny IV, Av. NS-10 (da LO-27 a LO-13), Bela Vista, Belo Vale, Buritirana, Jardim Bela Vista, Jardim Sônia Regina, Av. LO-05 (da NS-08 a T. Segurado), Lago Sul, Lunabel, Maria Rosa, Marly Camargo, Morada do Sol I, II e III, Morada do Vale, Setor Aeroporto, Setor Universitário, Setor Belo Horizonte, Setor Bertaville, Setor Industrial, Setor Irmã Dulce, Setor Santa Fé I, II, III e IV, Setor Santa Bárbara, Setor Santa Helena, Setor Sul, Setor União Sul, Sol Nascente, Taquaralto, Taquari (T-20, T-21, T-22, T-23, T-30, T-31, T-32 e T-33), Taquaruçu, Vale do Sol, Flamboyant, Recanto das Araras I, Recanto das Araras II e Loteamento Vitória.

Fonte: PMGIRS, adaptado pelo autor (2024).

Conforme levantado com o gestor da empresa MB Limpeza Urbana, as rotas de coleta são determinadas sem aplicação de metodologias específicas, ou seja, de forma empírica, muitas vezes definidas pela experiência do próprio motorista do veículo.

3.3 Levantamento de dados

Como já citado anteriormente, a empresa responsável pelo serviço de coleta e transporte de RSU no município de Palmas não utiliza nenhuma metodologia para a determinação dos roteiros de coleta, sendo estes definidos de forma empírica, muitas vezes definido pelo próprio motorista do veículo no momento da coleta. Com isso, não foi possível obter da empresa MB Limpeza Urbana o mapeamento do roteiro realizado pelo veículo, sendo necessário o levantamento de campo.

3.3.1 Metodologia de coleta dos dados em campo

Para o levantamento do roteiro praticado pelo veículo de coleta nas quadras 303 e 305 Norte, foi utilizado o aplicativo para telefone celular Strava, uma ferramenta de rastreamento via GPS. A escolha da ferramenta se deu por ser um aplicativo eficiente, gratuito e de fácil utilização. O Strava oferece diversas facilidades, como a capacidade de registrar com precisão os trajetos realizados, a análise detalhada do trajeto, assim como a visualização em tempo real do trajeto percorrido, facilitando a conferência.

A coleta dos dados em campo consistiu em seguir o veículo de coleta durante todo o percurso realizado pela equipe de coleta. O acompanhamento do veículo teve início desde sua saída da garagem e durou até o término das atividades de coleta.

Dessa forma, o uso do aplicativo Strava contribuiu significativamente para que fosse possível registrar o levantamento dos dados em campo.

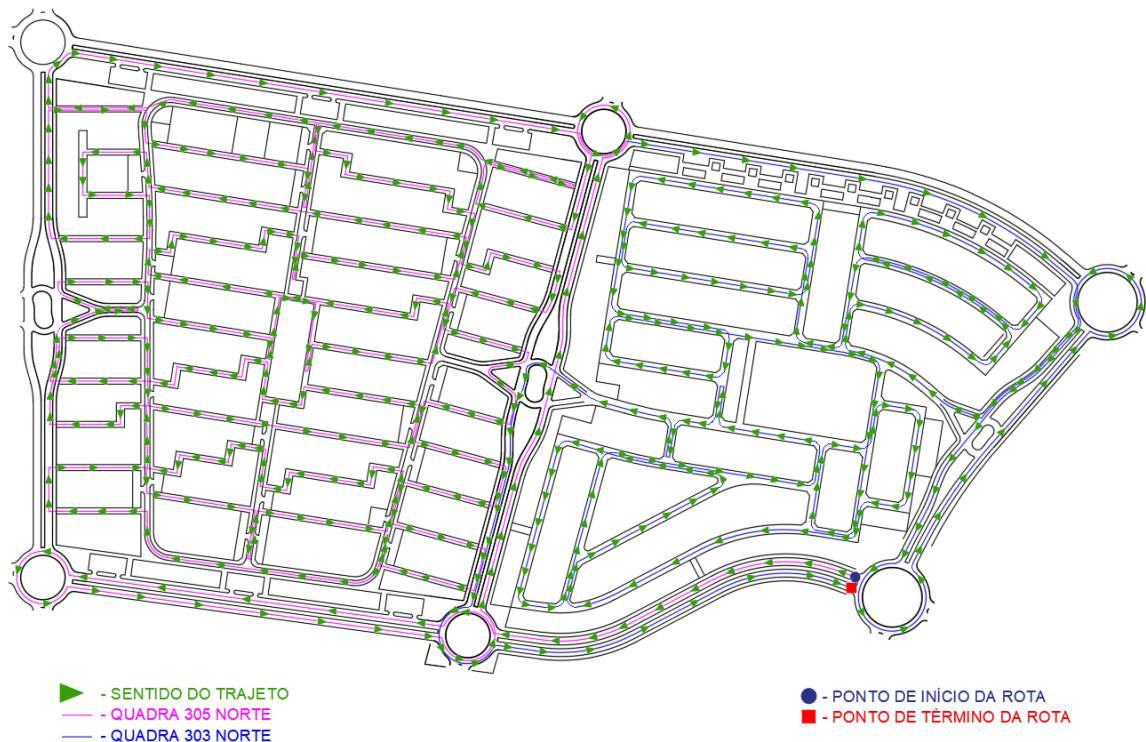
3.3.2 Processamento dos dados coletados

O veículo de coleta partiu da garagem da empresa MB Limpeza Urbano às 07h28min, dando início ao percurso do dia. O veículo se deslocou até as quadras correspondentes à rota de número 10, 303 e 305 Norte. Às 07h54min o veículo chegou ao ponto de partida da coleta e a equipe logo iniciou os trabalhos. A coleta se estendeu no período da manhã até às 11h26min, quando a equipe de coleta fez uma pausa para almoço e para descarregar o veículo no aterro sanitário. A coleta foi retomada às 14h25min e continuou até às 17h54min, finalizando as atividades de coleta.

3.3.3 Tratamento dos dados coletados

Com os dados coletados em campo, foi realizado o tratamento dos dados para ter mais clareza e compreensão do percurso realizado pelo veículo de coleta. Para o tratamento foi utilizando o software AutoCAD para mapear e sinalizar o percurso realizado pelo veículo de coleta. A Figura 15 ilustra o roteiro completo realizado pelo veículo de coleta, assim como o ponto de partida, a indicação do sentido do percurso e o ponto de término da coleta.

Figura 15 – Mapeamento do roteiro de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte



Fonte: Autor (2024).

Com o mapeamento do roteiro realizado pelo veículo de coleta, foi possível determinar a distância percorrida pelo veículo que totalizou 25.045,48 metros. Além disso, foi identificado que nem todas as ruas são percorridas pela equipe de coleta, sendo algumas dessas ruas sem residências ou ruas comerciais onde os resíduos são depositados em caçambas estacionários. Com isso, as ruas não percorridas pelo veículo de coleta também foram levantadas e totalizam 953,40 metros.

3.4 Aplicação do Problema do Carteiro Chinês e Algoritmo de Dijkstra

A aplicação do carteiro chinês na otimização de rotas de coleta de resíduos sólidos reside em determinar a rota mais eficiente a ser percorrida, sendo aquela que demanda menor distância e consequentemente menos tempo. O problema do carteiro chinês, nesse contexto, desempenha um papel crucial ao viabilizar a identificação do percurso mais curto e eficiente entre um conjunto de ruas, evitando repetições de trajetos e minimizando a distância percorrida pelos veículos de coleta.

De maneira geral, o problema do carteiro chinês na otimização de rotas de coleta de resíduos sólidos é resolvido inicialmente verificando se o grafo que

representa as ruas e os nós entre elas é euleriano. Um grafo é considerado euleriano se todos os seus vértices têm um grau par, o que significa que cada ponto de interseção (ou nó) possui um número par de conexões (ou arestas) com outros vértices. Se o grafo é euleriano, o problema pode ser resolvido de forma ótima utilizando o método de Euler. Este método permite encontrar um ciclo ou caminho que percorre todas as arestas exatamente uma vez, garantindo a eficiência na rota de coleta.

No entanto, se o grafo não for euleriano, é necessário transformá-lo em euleriano. Para isso, são acrescentadas arestas artificiais, ou seja, nós adicionais, de modo a garantir que todos os vértices tenham um grau par. Para determinar quais arestas adicionais devem ser incluídas, utiliza-se o algoritmo de Dijkstra. O algoritmo em questão encontra o caminho mais curto entre dois nós, o que permite adicionar as arestas de maneira a minimizar a distância extra percorrida.

Uma vez que o grafo foi transformado em euleriano com a adição das arestas necessárias, aplica-se novamente o método de Euler para encontrar a rota ótima. Dessa forma, é possível determinar a rota mais eficiente a ser percorrida, minimizando a repetição de trajetos e reduzindo a distância total que os veículos de coleta precisam percorrer.

Por consequência, um dos objetivos na aplicação do carteiro chinês é a minimização do custo total, onde o custo é representado pela distância total percorrida. Além disso, essa abordagem contribui de maneira significativa para a preservação do meio ambiente, uma vez que a eficiência na coleta se traduz em menor impacto ambiental.

Dessa maneira, a aplicação do Problema do Carteiro Chinês emerge como uma ferramenta estratégica e eficaz, proporcionando não apenas eficiência logística, mas também benefícios socioeconômicos e ambientais para a gestão de resíduos sólidos urbanos.

3.5 Implementação do Algoritmo em Python

3.5.1 Bibliotecas utilizadas

O Python possui diversos pacotes de códigos prontos que podem ser exportados e utilizados em diversos projetos, esses pacotes de códigos são

chamados de bibliotecas. Dentre as bibliotecas disponibilizadas, neste trabalho foram empregadas *Matplotlib*, *NetworkX*, *OSMnx*, *CSV*, *Shapely*, *Postman Problems* e *Graphviz*.

A biblioteca *matplotlib.pyplot* é utilizada para criar visualizações gráficas. Baseado em coordenadas geográficas o código desenha um polígono no gráfico e exibe em tela a imagem.

Já a biblioteca *networkx* é uma biblioteca poderosa que permite a criação e manipulação de grafos. A ferramenta também é usada para desenhar e plotar os grafos.

A biblioteca *osmnx* é uma ferramenta especializada para trabalhar com dados do *OpenStreetMap*, de onde são extraídas as coordenadas geográficas. Por meio da biblioteca *osmnx* o código consegue obter os dados geográficos para construção do grafo e conversão em grafo não direcionado.

Já a biblioteca *csv* desempenha um papel fundamental na aplicação do modelo. A biblioteca *csv* permite a exportação dos dados do grafo para um formato tabular. Nessa tabela são gravados os dados dos nós e arestas do grafo assim como o peso de cada aresta, o que posteriormente permite a determinação da rota ótima.

Outra biblioteca é a *shapely*, utilizada para a manipulação de dados geométricos. No código, a biblioteca é utilizada para criar um polígono a partir de coordenadas específicas, definindo a área geográfica que será usada para gerar o grafo.

Para solucionar o problema, a biblioteca *postman_problems* é utilizada para resolver o Problema do Carteiro Chinês. A ferramenta é responsável por calcular e determinar a rota mínima de um percurso.

Por último, a biblioteca *graphviz* é uma ferramenta utilizada para a criação, visualização e manipulação de grafos e diagramas estruturados. Ela permite a construção de grafos direcionados e não direcionados, oferecendo algoritmos de layout automáticos para posicionamento otimizado de nós e arestas. Com funcionalidades para customização e estilização, *graphviz* facilita a visualização clara de estruturas complexas através de diversos formatos de saída como PNG, SVG e PDF. A biblioteca é essencial para representar, analisar e visualizar relações e estruturas de dados de forma eficiente e compreensível.

3.5.2 Resolução do problema

Foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) *PyCharm* para a aplicação do algoritmo de Dijkstra. O código começa com a importação das bibliotecas necessárias e já apresentadas anteriormente: *matplotlib.pyplot* para visualização gráfica, *networkx* para criação e manipulação de grafos, *osmnx* para obtenção e processamento de dados geográficos, *csv* para manipulação de arquivos CSV, *shapely.geometry* para manipulação de dados geométricos, *postman_problems* para solução do Problema do Carteiro Chinês e *graphviz* para criação e plotagem da rota obtida na otimização.

Em seguida, são configuradas algumas definições do *osmnx*, como o uso de cache e a exibição de logs no console, o que facilita a depuração e melhora a eficiência do processamento dos dados geográficos.

O próximo passo é inserir no código dados referentes a localização das coordenadas que serão empregadas no modelo como cidade, estado e país. No entanto, esses dados não são utilizados posteriormente no código, pois a área de interesse é especificada diretamente pelas coordenadas geográficas. Foi informado ao código as coordenadas do ponto central que foi entre as quadras 303 e 305 Norte e indicado um raio de alcance que posteriormente foi delimitado pelas coordenadas do polígono.

Depois, utilizando a biblioteca *shapely* é criado um polígono que representa a área geográfica de interesse a partir das coordenadas geográficas fornecidas. Utilizando o *OpenStreetMap*, são coletadas as coordenadas que formam o contorno das quadras 303 e 305 Norte, em seguida as coordenadas são informadas ao algoritmo que delimita a área de contorno das duas quadras, gerando o polígono correspondente da área. As coordenadas do polígono são então extraídas para que possam ser desenhadas utilizando a biblioteca de plotagem *matplotlib*.

Figura 16 – Polígono que delimita a região das quadras 303 e 305 Norte.
Coordenadas expressas em graus e decimais do grau (DDD°DDDDD).

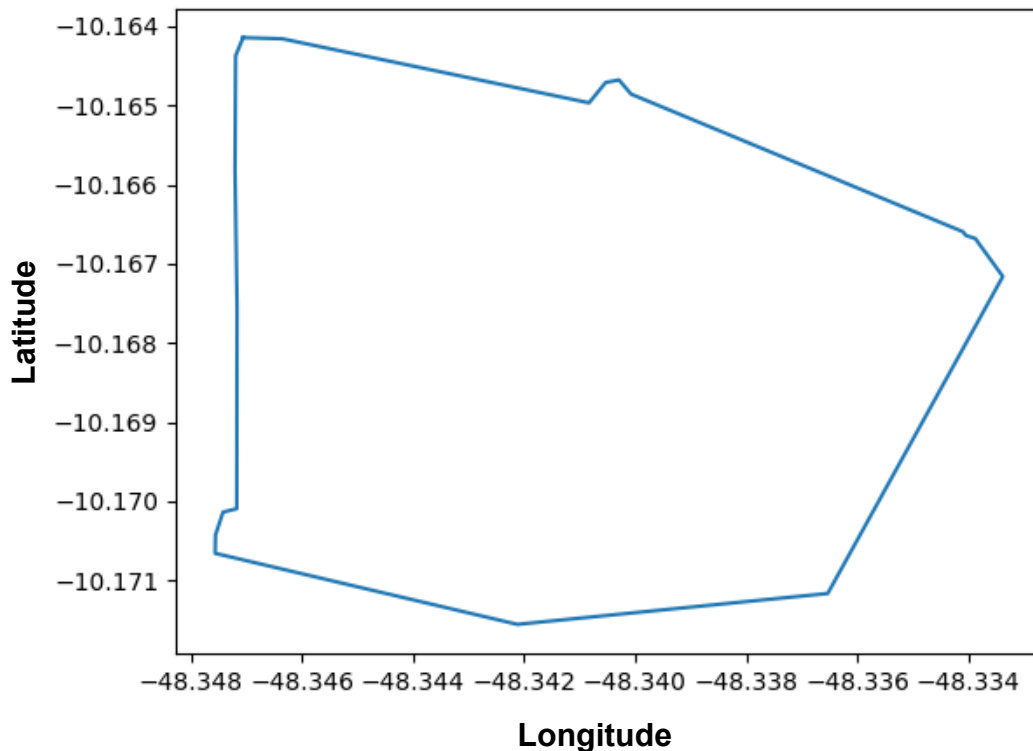
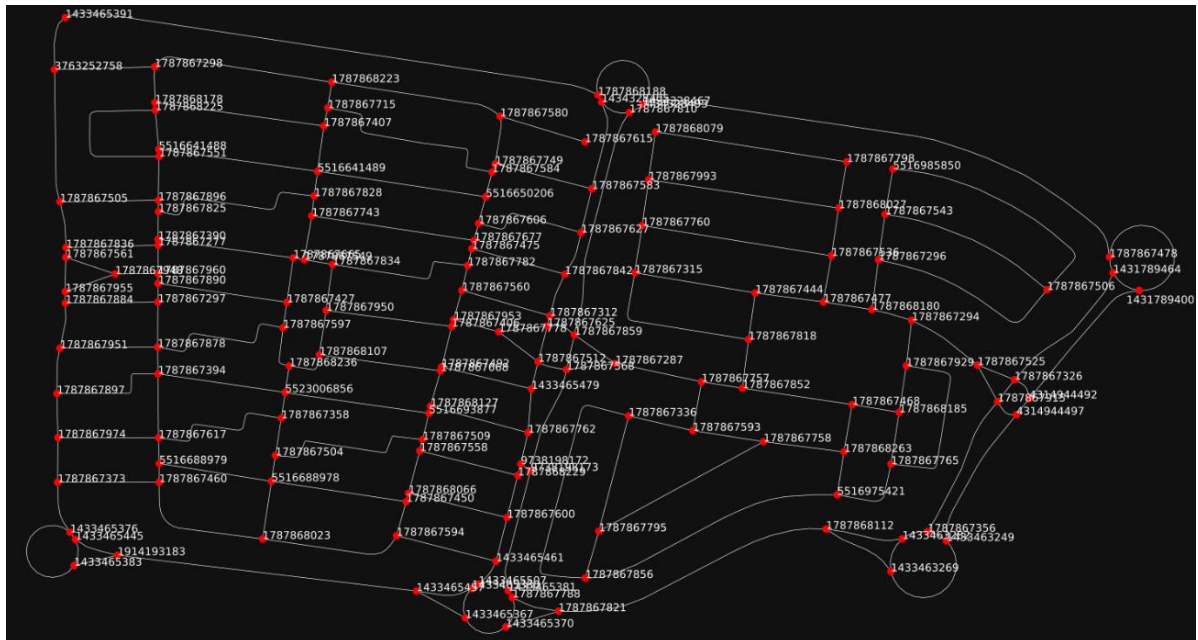


Figura 18 – Grafo corrigido das quadras 303 e 305 Norte



Fonte: Autor (2024).

Por fim, para solucionar o problema depois do grafo gerado, foi informado ao programa *PyCharm* que o problema seria resolvido como Problema do Carteiro Chinês. Com isso, utilizando a biblioteca *postman problem* foi informado o comando *calculate_postman_solutions_stas*, indicando ao código que os dados utilizados como base seriam os nós e arestas exportados do grafo em arquivo CSV. Em seguida, foi indicado o nó de início da rota ótima, baseado no ponto de partida levantado em campo. Em seguida o código é executado e o comando *print* exibe no terminal de saída os resultados obtidos, como distância total obtida com a rota ótima, os trechos percorridos de forma duplicada e o comprimento de nó a nó.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Discussão dos resultados encontrados

Após todos os passos realizados anteriormente, o *PyCharm* exibe no terminal de saída os resultados obtidos para as quadras 303 e 305 Norte, que foram apresentados no Quadro 03. Os resultados apresentados pelo *Pycharm* estão expressos em metros. Interpretando os resultados obtidos, primeiro o programa apresenta a distância de nó a nó e, logo em seguida, realiza o cálculo da distância total percorrida, assim como os trechos duplicados.

Quadro 03 – Resultados obtidos pelo algoritmo para a rota de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte

DESCRIÇÃO	RESULTADO
Distância total percorrida	26.006,24 metros
Distância percorrida de forma duplicada	4.060,81 metros
Distância percorrida uma única vez	21.945,43 metros
Distância percorrida necessária para realizar a rota de coleta de RSU	26.006,24 metros
Nós percorridos	307
Nós percorridos de forma duplicada	69
Nós percorridos uma vez	238
Nós percorridos necessários para realizar a rota de coleta de RSU	307

Fonte: Autor (2024).

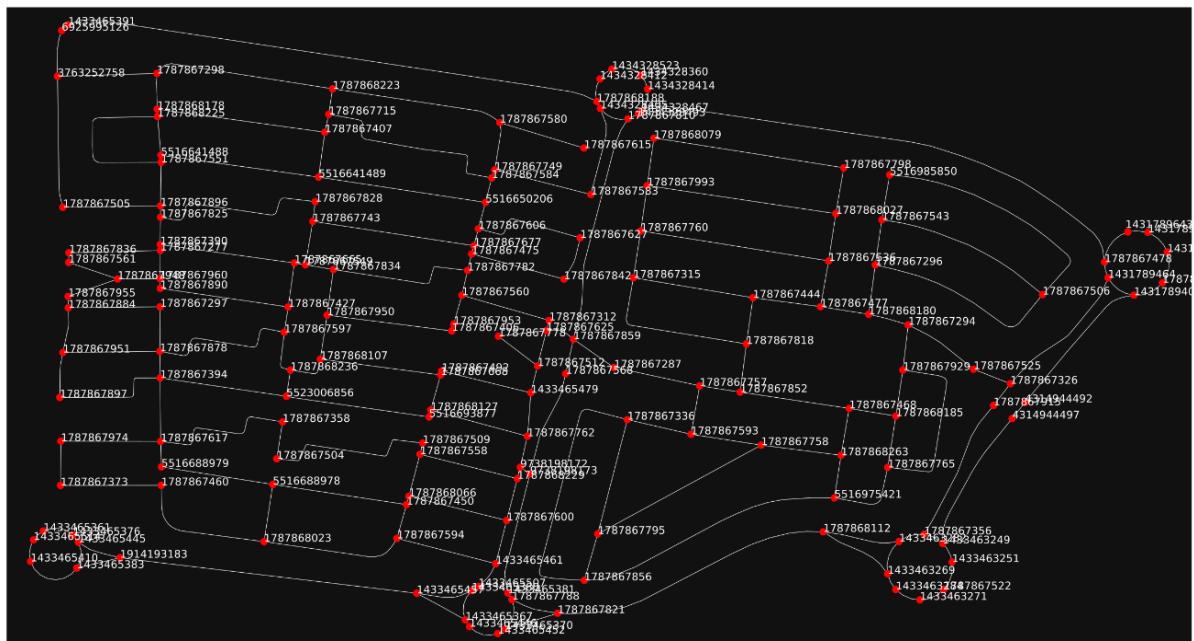
Com a execução do programa *PyCharm*, o algoritmo obteve a rota ótima de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte com uma distância percorrida de 26.006,241 metros. A distância total percorrida em duplicidade foi de 4.060,812 metros, enquanto a distância total, caso fosse possível percorrer cada via apenas uma vez, seria de 21.945,429 metros. O algoritmo percorreu um total de 307 nós, sendo que desse total, 238 foram percorridos uma única vez e 69 foram percorridos ao menos duas vezes.

Com os resultados obtidos utilizando o algoritmo, podemos comparar com os resultados encontrados no levantamento de campo. A distância total percorrida pelo

veículo e que foi obtida em campo é de 25.045,48 metros. Dessa forma, ao comparar os resultados, pôde-se observar que a rota ótima obtida pelo algoritmo foi 960,76 metros mais extensa. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato de que a rota realizada na prática pelo veículo não abrange a totalidade das ruas, deixando 953,40 metros sem serem percorridos, enquanto o algoritmo considerou todas as ruas pertencentes as quadras 303 e 305 Norte para a determinação da rota ótima.

Assim, a fim de tornar a análise mais igualitária, foi realizado um segundo tratamento dos dados. Nesse segundo tratamento, foram removidas do grafo gerado pelo algoritmo todas as arestas que não são percorridas pelo veículo de coleta, resultando no grafo apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Grafo do roteiro de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte



Fonte: Autor (2024).

Após a remoção das arestas que não são percorridas pelo veículo de coleta, o algoritmo foi novamente executado no programa *PyCharm* e os resultados obtidos são apresentados a seguir no Quadro 04.

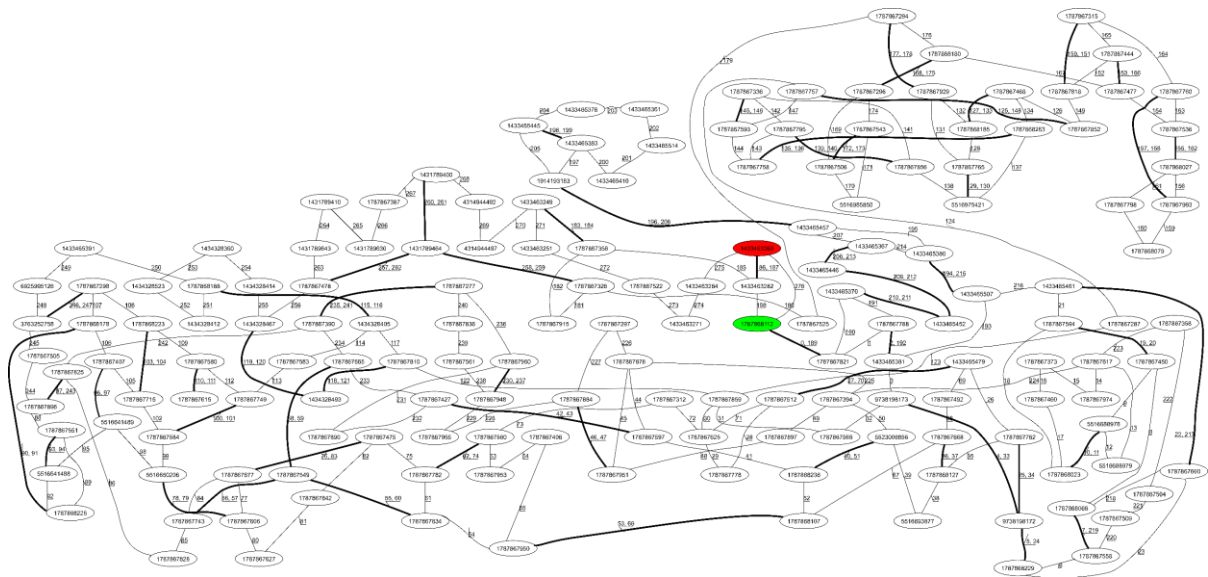
Quadro 04 – Resultados obtidos pelo algoritmo para a rota ótima de coleta de RSU das quadras 303 e 305 Norte

DESCRIÇÃO	RESULTADO
Distância percorrida	24.821,33 metros
Distância percorrida de forma duplicada	3.748,99 metros
Distância percorrida uma única vez	21.072,34 metros
Distância percorrida necessária para realizar a rota de coleta de RSU	24.821,33 metros
Nós percorridos	277
Nós percorridos de forma duplicada	58
Nós percorridos uma vez	219
Nós percorridos necessários para realizar a rota de coleta de RSU	277

Fonte: Autor (2024).

Assim, após o segundo tratamento, a rota ótima determinada pelo algoritmo resultou em uma diferença de 224,15 metros a menos que a rota realizada pelo veículo de coleta. A distância total encontrada pelo algoritmo foi de 24.821,33 metros, com um total de 277 nós percorridos, sendo 219 percorridos uma única vez e 58 pelo menos duas vezes. Com isso, conforme a Figura 20, o programa realiza a plotagem da rota obtida pelo algoritmo, os números nos balões representam os nós, as linhas em negrito representam os trechos percorridos mais de uma vez e os números identificando as arestas sinalizam a ordem do percurso. Adicionalmente, o balão em verde sinaliza o ponto de partida e o balão em vermelho sinaliza o penúltimo nó, sendo que o ponto de término é o mesmo de partida.

Figura 20 – Rota ótima obtida pelo algoritmo para as quadras 303 e 305 Norte



Fonte: Autor (2024).

Com isso, no Quadro 05 é detalhada a economia obtida com a otimização do roteiro de coleta. O resultado encontrado pelo algoritmo resulta em uma economia de 224,15 metros por dia de coleta, o que representa, ao longo de um ano, uma economia de 32.277,60 metros. A economia obtida pode resultar em benefícios como redução no tempo de coleta, menor consumo de combustível, prolongamento da vida útil do veículo e, conseqüentemente, uma redução no custo total da coleta de RSU.

Quadro 05 – Economia na distância percorrida ao longo de um ano

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS		
ROTA ATUAL - RA	ROTA ÓTIMA - RO	DIFERENÇA (RA - RO)
25.045,48 metros	24.821,33 metros	224,15 metros
DISTÂNCIA	FREQÜÊNCIA DE COLETA	TOTAL DE DIAS NO ANO
224,15 metros	3 X por semana	144 dias
ECONOMIA (metros/ano)		32.277,60 m/ano

Fonte: Autor (2024).

A fim de melhor representar a economia obtida com a rota ótima encontrada pelo algoritmo, no Quadro 06 foram levantados, de forma representativa, alguns custos que compõem as despesas mensais de um veículo de coleta. Esses custos

incluem despesas como depreciação, IPVA, licenciamento, seguro, manutenção e consumo do veículo.

Quadro 06 – Descrição dos custos mensais de um veículo

DESPESAS MENSAIS COM UM VEÍCULO			
Distância percorrida ida e volta (km/mês) =		300,55	
DEPRECIAÇÃO			
Veículo		1,00	
Quantidade de Veículos comprados =		502000,00	
Custo Total do Veículo =		8	
Depreciação (anos) =		20%	
Valor Residual =		R\$4,183,33	
Depreciação mensal (R\$) =		R\$4,183,33	
REMUNERAÇÃO DE CAPITAL			
Custo de capital-Taxa SELIC (% a.a.) =		12,25%	
Custo de capital-Taxa SELIC (% a.m.) =		1,02%	
Investimento Médio Caminhão =		R\$329,885,71	
Remuneração mensal do capital investido (R\$) =		R\$3,367,58	
LICENCIAMENTO E SEGUROS			
		Total anual	
IPVA (unidade) =	10,040,00	10,040,00	
Seguro Obrigatório + Licenciamento (unidade) =	482,22	482,22	
Seguro contra terceiros (unidade) =	15,060,00	15,060,00	
Impostos e Seguros (R\$) =		R\$2,131,85	
COMBUSTÍVEL E LUBRIFICAÇÃO			
	Consumo	Custo unitário	Custo Total
Consumo de Óleo Diesel (km/l) =	1,50	6,6	1322,42
Consumo de Óleo do motor (1.000km) =	5,40	33,32	54,08
Consumo de Óleo de transmissão (1.000km) =	1,10	30,9	10,22
Consumo de Óleo hidráulico (1.000km) =	4,35	27,5	35,95
Consumo mensal com graxa (kg/1.000km) =	7,80	23,41	54,88
Consumo mensal com óleo de direção (1.000km) =	0,95	27,9	7,97
Consumos (R\$) =		R\$1,485,51	
MANUTENÇÃO			
Vida Útil do Caminhão (anos) =	8	Total Veículo	
Coeficiente de Manutenção (Sicro) =	0,9		
Custo de manutenção mensal (R\$/mês) =		R\$4,621,88	
PNEUS E RECAUCHUTAGENS			
		Custo Unitário	
Preço do Pneu Novo (R\$) =		R\$1,499,90	
Preço da Câmara Nova (R\$) =		R\$100,00	
Preço do Protetor Novo (R\$) =		R\$100,00	
Número total de Pneus do Veículo e do Equipamento =		6	
Preço da Recauchutagem (R\$) =		R\$691,00	
Vida útil do pneu novo (km) =		70000	
Vida útil do pneu com recauchutagem (km) =		50000	
Quilometragem rodada no mês (km) =		301	
Preço de pneus e recauchutagem por kilometro rodado (R\$/km) =		R\$0,14	
Preço Mensal de Pneus e Recauchutagem (R\$/mês) =		R\$41,04	
Reserva Técnica=		R\$968,28	
TOTAL MENSAL =		R\$9,248,56	

Fonte: Autor (2024).

Os custos obtidos para a distância percorrida pelo veículo atualmente são de R\$9.248,56 por mês. Considerado que, mensalmente, o veículo percorre 300,55 quilômetros, ao dividir os custos mensais pela distância percorrida, encontra-se um custo de R\$30,77 por quilômetro percorrido. Dessa forma, considerando o custo por quilômetro percorrido, a economia na distância percorrida ao longo de um ano, que foi de 32,28 quilômetros, representa uma economia nos custos de R\$993,26 por ano.

Com isso, a economia obtida com a redução do percurso pode ser reinvestida em melhorias para a prestação do serviço, como a melhoria da manutenção dos veículos, aquisição de novas tecnologias, ou até mesmo na formação e capacitação dos colaboradores. A economia na distância percorrida resulta em impactos positivos ao meio ambiente, com a diminuição das emissões de gases poluentes e menor consumo de combustível, alinhando-se a práticas mais sustentáveis.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas e das comparações efetuadas, pode-se constatar que a diferença na distância percorrida na rota 10, composta pelas quadras 303 e 305 Norte, não foi muito significativa, apresentando um total de 224,15 metros a menos utilizando o menor caminho encontrado pelo algoritmo. Entretanto, embora essa redução possa parecer pequena em um contexto isolado, ao expandirmos essa otimização para todas as quadras de uma cidade, cada metro a menos percorrido representa uma economia de tempo e dinheiro significativa.

A análise permitiu confirmar que o roteiro atualmente praticado pode ser otimizado, afinal os roteiros de coleta são feitos de forma empírica, ou seja, sem a adoção de metodologias. A implementação de roteiros otimizados para a coleta de resíduos sólidos urbanos não só diminui os custos operacionais, como também, melhora a gestão do serviço de coleta como um todo.

Dessa forma, é evidente a importância de se considerar a aplicação de métodos, como a aplicação de algoritmos, como o de Dijkstra, e o uso de ferramentas de desenvolvimento como o *PyCharm*, para melhorar a gestão da coleta de resíduos sólidos urbanos. Essa abordagem não apenas visa a otimização de rotas, mas também contribui para a redução de custos, o aumento da eficiência e a minimização de impactos ambientais.

Portanto, a utilização de tecnologias e métodos de otimização no planejamento das rotas de coleta podem resultar em benefícios substanciais ao longo do tempo, reforçando a necessidade de investimentos contínuos em inovação e desenvolvimento para a melhoria dos serviços públicos.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acessado em: 07/09/2023.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acessado em: 07/09/2023.

BELIEN, J., DE BOECK, L. E VAN ACKERE, J. **Municipal Solid Waste Collection Problems: A Literature Review**. *Hub Research Papers* (2011/34): 30-32, 2011.

WU, HAILIN; TAO, FENGMING; YANG, BO. **Optimization of vehicle routing for waste collection and transportation**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 14, p. 4963, 2020.

KONOWALENKO, F. **Problema do carteiro chinês não-orientado e misto para a otimização de rotas na cidade de Irati/PR**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acessado em: 08/09/2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 71p, 2004.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Marco Legal do Saneamento Básico**. Brasília, DF. Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>. Acessado em: 09/09/2023.

LOPES, A.A. **Estudo da gestão e do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos no município de São Carlos (SP)**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo: São Carlos, SP, Brasil, 2003.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Cartilha de Limpeza Urbana, 2001**. Disponível em: <https://www.ibam.org.br/wp-content/uploads/2023/06/cartilha_limpeza_urb.pdf>. Acessado em: 10/09/2023.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Brasília: Funasa: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/506/Manual_de_S

aneamento_Funasa_5a_Edicao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 12/10/2023.

DE SOUZA XAVIER, Reinaldo. **Modelagem e minimização do consumo de combustível para rotas de coleta de lixo**. 2010.

LIMA, R. S.; LIMA, J. P.; SILVA, T. V. V. **Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos**. Journal of Transport Literature, v. 6, p. 180-196, 2012.

PINHEIRO, I. G.; FERREIRA, J. A. **Economicidade dos Serviços de Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, escola de contas e gestão do TCE-RJ, 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados do Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/palmas/panorama>>. Acessado em: 19/11/2023.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

MELQUIADES, J. A. R. **Modelagem para a roteirização do processo de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos**. 2015.

LUNES, A. **Análise das Rotas de Coleta de Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos em Pau dos Ferros – RN**, 2020.

DETOFENO, T. C.; STEINER, M. T. A. **Otimização das Rotas de Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo de Caso em Joinville-SC**. XLI SBPO, 2009.

VULCANI, R. L. A. **Grafos Eulerianos e Aplicações**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) -Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2015.

OLIVEIRA, G. F. **O Problema do Carteiro Chinês**. Dissertação. Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2020.

LIMA, E. F. **Otimização de roteiro de coleta de resíduos sólidos urbanos para a quadra 405 norte, no município de Palmas-TO**. Palmas, TO, 2023.

GOLDBARG, MARCO CESAR; LUNA, HENRIQUE PACCA L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Elsevier, 2005.

MORO, M. F. **O problema do carteiro chinês aplicado na otimização de rotas usadas na coleta de lixo reciclável: um estudo de caso**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

ROSA, I. O. d. **Modelo conceitual para o gerenciamento de riscos à segurança de instalações portuárias: uma abordagem construtivista**. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2015.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20120. Disponível em:< https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm >. Acessado em 25/12/2023.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**; Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

PMGIRS – Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. **Meta 04**. Versão Preliminar. Prefeitura de Palmas. Palmas. 2023.

OLIVEIRA, F.J.T. **Otimização do roteiro de coleta de resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso no Município de Pombal - PB**. 32 fls. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB. 2016.

KRIPKA, MOACIR et al. **Otimização da Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares no Município de Marau/RS: Coleta Porta a Porta**. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo-RS. 2009.

COTO, E. **Algoritmos básicos de grafos**. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. 2003.

BARROS, E. A.; PAMBOUKIAN, S. V.; ZAMBONI, L. C. **Algoritmo de dijkstra: apoio didático e multidisciplinar na implementação, simulação e utilização computacional**. In: International Conference on Engineering and Computer Education. [S.l.: s.n.], 2007

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2019.