



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

CAMPUS PALMAS

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTER DE FREITAS LIMA

**OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
PARA A QUADRA 405 NORTE, NO MUNICÍPIO DE PALMAS-TO**

PALMAS - TO

2023

ESTER DE FREITAS LIMA

OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A
QUADRA 405 NORTE, NO MUNICÍPIO DE PALMAS-TO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Licenciatura em Engenharia Civil
do *campus* Palmas do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
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

2023

ESTER DE FREITAS LIMA

OTIMIZAÇÃO DE ROTEIRO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA A
QUADRA 405 NORTE, NO MUNICÍPIO DE PALMAS-TO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Licenciatura em Engenharia Civil
do *campus* Palmas do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 08/08/2023

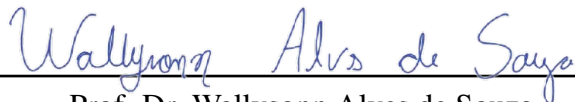
BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 CLAUDIA DA SILVA AGUIAR REZENDE
Data: 08/08/2023 15:12:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 THIAGO DIAS DE ARAUJO E SILVA
Data: 08/08/2023 14:02:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.Dr. Thiago Dias de Araujo e Silva
IFTO- Palmas



Prof. Dr. Wallysonn Alves de Souza
IFTO- Palmas

Dedico este trabalho a Deus que me deu forças
e a minha família que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter me sustentado até aqui, por ter sido minha rocha, meu auxílio, a minha força sem dúvidas vem dEle. Agradeço imensamente a minha mãe, por sempre declarar palavras de afirmação positivas ao meu respeito, pelos conselhos, pelo colo e por toda ajuda, se hoje consegui chegar até aqui, devo muito a ela. Agradeço também ao meu pai por sempre acreditar no meu potencial e investir em mim, seria muito difícil para mim sem a ajuda dele. Agradeço a minha orientadora, Prof. Dr. Claudia por toda paciência e auxílio e por todo apoio e incentivos. Ao meu coorientador, prof. Dr. Carlos por me ensinar tanto e pela disposição em compartilhar conhecimento. Agradeço a todos os meus amigos, que sempre me incentivam e acreditam no meu potencial, sem eles tudo se tornaria mais difícil e solitário.

“Um especialista em resolver problemas deve ser dotado de duas capacidade incompatíveis - uma imaginação inquieta e uma paciente obstinação.”

(Howard W. Eves)

RESUMO

O crescimento populacional e as elevadas taxas de consumo geram uma quantidade significativa de lixo, tornando a gestão de resíduos uma tarefa crucial para preservar a qualidade de vida nas cidades e proteger a saúde pública. O gerenciamento desses resíduos envolve a coleta e o transporte para uma área adequada, onde possam ser tratados de forma apropriada. No entanto, a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) possui um alto custo para sua implementação, representando o maior custo no processo de gerenciamento de RSU, pois é uma atividade que ocorre diariamente, abrange extensas áreas, exige investimentos em equipamentos, infraestrutura e pessoal qualificados. A coleta de RSU representa 50% dos recursos orçamentários municipais destinados a limpeza urbana nos municípios brasileiros, sendo um grande desafio para os gestores. Adotar uma rota otimizada para a coleta do RSU implica em economia significativa de combustível, de tempo e dos veículos empregados na coleta. O presente trabalho visa analisar os mecanismos necessários para otimizar a rota de coleta da quadra 405 Norte, utilizada na cidade de Palmas-TO, com o objetivo de reduzir os custos relacionados à coleta de RSU. O problema de determinação de rotas foi modelado como Problema do Carteiro Chinês (PCC). Como proposta de solução do PCC utilizou-se uma técnica em que o grafo da rota é transformado em grafo euleriano a partir do qual pode-se encontrar a solução do problema. A proposta apresentada mostrou que as rotas podem ser melhoradas implicando em uma economia relevante para a coleta de RSU.

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

ABSTRACT

Population growth and high consumption rates generate a significant amount of waste, making waste management a crucial task to preserve the quality of life in cities and protect public health. Managing this waste involves collecting and transporting it to a suitable area where it can be properly treated. However, the collection of urban solid waste (MSW) has a high cost for its implementation, representing the highest cost in the MSW management process, as it is an activity that occurs daily, covers extensive areas, requires investments in equipment, infrastructure and qualified personnel. The collection of MSW represents 50% of municipal budget resources destined to urban cleaning in Brazilian municipalities, being a great challenge for managers. Adopting an optimized route for MSW collection implies significant savings in fuel, time and vehicles used in collection. The present work aims to analyze the necessary mechanisms to optimize the collection route of block 405 North, used in the city of Palmas-TO, with the objective of reducing costs related to the collection of MSW. The route determination problem was modeled as the Chinese Postman Problem (CCP). As a proposed solution for the PCC, a technique was used in which the route graph is transformed into an Eulerian graph from which the solution to the problem can be found. The presented proposal showed that the routes can be improved resulting in a relevant economy for the MSW collection.

Keywords: Urban solid waste collection; optimization; routes; Postman Problem Chinese.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gravimetria de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (2020).	16
Figura 2 – Estimativa de geração de resíduos por população.	18
Figura 3 – Índice de coleta de RSU no Brasil em 2022.	19
Figura 4 – Coletor convencional sem compactação.	20
Figura 5 – Coletor convencional com compactação.	21
Figura 6 – Comparativo entre a disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2021 (t/ano e %)	23
Figura 7 – Comparativo entre a disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2022 (t/ano e %)	23
Figura 8 – Grafo euleriano	27
Figura 9 – Localização de Palmas	31
Figura 10 – Despesas com manejo de resíduos sólidos urbanos per capita.	32
Figura 11 – Custos anuais com limpeza urbana de Palmas.	32
Figura 12 – Equipes de coleta.	36
Figura 13 – Rota 405 norte	37
Figura 14 – Representação do problema do carteiro chinês.	38
Figura 15 – Mapa gerado	43
Figura 16 – Mapa da quadra 405 norte	43
Figura 17 – fluxograma	44
Figura 18 – Resultado do menor caminho	45
Figura 19 – caminho otimizado	45
Figura 20 – Indicação de caminho otimizado	46
Figura 21 – Rota estimada pela empresa	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência de coleta quadras comerciais e outras.	33
Tabela 2 – Frequência de coleta em feiras e quadras.	34
Tabela 3 – Coleta em quadras residenciais, loteamentos e vilas	34
Tabela 4 – Coleta em quadras residenciais e loteamentos	35
Tabela 5 – Caracterização dos veículos utilizados para coleta de RSU em Palmas . . .	36
Tabela 6 – Informações coleta da quadra	37
Tabela 7 – Economia de quilometragem em um ano	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema da pesquisa	12
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Resíduos sólidos urbanos	15
2.2	Sistema de Gestão dos Resíduos Sólidos	16
2.3	Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos	19
2.4	Coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Palmas	23
2.5	Proposta de solução para coleta de resíduos sólidos urbanos	24
3	METODOLOGIA	30
3.1	Área de estudo	30
3.2	Caracterização da coleta de resíduos sólidos em Palmas	33
3.3	Proposta de otimização de roteiro de coleta de resíduos sólidos em Palmas	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei 12.305 Brasil (2010) , os resíduos sólidos referem-se a materiais, objetos ou substâncias que são descartados pela população. Em 2022, o Brasil gerou cerca de 82 milhões de toneladas de resíduos, de acordo com a Associação Brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais (ABELPE, 2022).

Compete às prefeituras municipais a responsabilidade pelo transporte, coleta e destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos, bem como pela gestão e fiscalização dos serviços de limpeza urbana. De acordo com a Abelpe (2022), a média de atendimento de coleta de resíduos sólidos no Brasil foi de 93% da população. No entanto, na região Norte, essa cobertura é um pouco menor, atingindo 79%.

A coleta de resíduos é fundamental para minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública. O objetivo principal dessa atividade é garantir a retirada do lixo das ruas e residências, e encaminhá-lo para o destino correto, onde é disposto de forma apropriada, evitando a contaminação do solo, da água e do ar, bem como a proliferação de vetores que podem prejudicar a saúde humana.

Além disso, a coleta de resíduos é essencial para manter as cidades limpas e agradáveis para se viver. Uma cidade com ruas e praças limpas e bem cuidadas é mais saudável, mais atraente para turistas e investidores, e proporciona uma melhor qualidade de vida para seus habitantes. Em resumo, a coleta de resíduos é uma medida essencial para preservar o meio ambiente e garantir o bem-estar das pessoas.

Um dos principais desafios associados à coleta de resíduos sólidos é o custo envolvido nesse processo. Segundo Carvalho (2001), os serviços de limpeza urbana podem absorver entre 7% e 15% dos recursos do orçamento municipal, sendo que metade desse valor é destinado especificamente para o transporte e coleta de resíduos sólidos. Esses custos elevados estão relacionados a diversos fatores, como a necessidade de investimentos em infraestrutura para a construção de aterros sanitários, aquisição de equipamentos para a coleta e transporte de resíduos, pagamento de salários para os funcionários envolvidos na operação, entre outros.

Por isso, é fundamental que as prefeituras busquem alternativas para otimizar os recursos e reduzir os gastos associados à coleta de resíduos. Assim, é fundamental buscar alternativas para reduzir os custos e aumentar a eficiência das operações. Desse modo, o presente trabalho, Assim, este estudo teve como objetivo modelar a rota de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na quadra 405 Norte, localizada no município de Palmas-TO, utilizando o conceito do Problema do

Carteiro Chinês (PCC). Para alcançar uma rota otimizada, o grafo original foi convertido em um grafo euleriano, permitindo assim encontrar uma rota quase ideal para o problema. A principal meta desse trabalho foi reduzir a distância percorrida durante a coleta.

1.1 Problema da pesquisa

O serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos é uma atividade extremamente necessária para a ordem das cidades e bem-estar da população. Para tanto, o serviço deve ser realizado de forma regular e eficiente visando cobrir todas as áreas e destinar o lixo ao local.

A coleta de resíduos é um serviço que abrange uma grande área e, portanto, envolve altos custos para sua implementação, sendo a etapa mais cara do serviço de gerenciamento de resíduos sólidos. Além disso, a geometria das quadras, a disposição das vias e suas características são fatores que impactam nos custos associados a esse serviço. Diante desse cenário, como é possível otimizar a distância percorrida nas rotas de coleta de resíduos para reduzir custos?

O trabalho do carteiro, consiste em receber as correspondências na central de correios, entregá-las nas residências e retornar à central. O carteiro deve percorrer a área de entrega, passando por todas as ruas pelo menos uma vez. O objetivo é encontrar o caminho mais curto possível para otimizar o circuito. Isso é conhecido como o Problema do Carteiro Chinês (PCC), pode ser resolvido com algoritmos de otimização. No entanto, devido à configuração das ruas, avenidas e becos, alguns trechos acabam sendo percorridos mais de uma vez desnecessariamente. Portanto, o objetivo real desse problema é minimizar a quantidade de trechos percorridos duas ou mais vezes.

Neste trabalho, a quadra 405 Norte, localizada na cidade de Palmas, foi selecionada como objeto de estudo. A rota dessa quadra foi modelada como um Problema do Carteiro Chinês e, em seguida, aplicou-se uma sequência de metodologias que resultaram na proposta de uma rota otimizada.

1.2 Justificativa

A coleta de resíduos sólidos urbanos é realizada por veículos coletores, que necessitam fazer a coleta regular de todo o lixo produzido na cidade. No Brasil segundo dados do Sistema Nacional de informação sobre saneamento (SNIS, Brasil (2021)) , são gastos aproximadamente R\$ 27 bilhões com manejo dos resíduos sólidos urbanos, e o maior gasto do orçamento destinado

aos serviços de limpeza urbana são com os serviços de coleta e transporte de resíduos. Para que este valor seja reduzido é necessário um planejamento e rotas bem definidas do percurso a ser feito para realizar a atividade com a menor distancia possível.

Um estudo realizado por Malakahmad et al. utilizou o GIS para otimizar as rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Ipoh, Malásia. O objetivo era minimizar a distância percorrida nesse processo, que representa uma grande parte dos recursos financeiros da administração da cidade. Os resultados mostraram uma redução de aproximadamente 22% na distância percorrida durante a coleta de resíduos sólidos urbanos.

Vu et al. desenvolveram uma Rede Neural Artificial (RNA) para estimar a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) recicláveis e não recicláveis na cidade de Austin, Texas, EUA. Com base nessa estimativa e no modelo do Problema de Roteamento de Nós, os autores propuseram uma solução para o problema da coleta de RSU, resultando em uma rota, em média, 19,9% mais curta em comparação com a rota não modificada.

As empresas responsáveis pela coleta e transporte de resíduos geralmente não realizam um estudo de rotas econômicas. Dessa forma, as rotas são realizadas de forma intuitiva, e muitas vezes dependem da escolha dos motoristas para o trajeto a ser percorrido durante a coleta.

No município de Palmas, as rotas utilizadas não possuem um planejamento ou estudo, são definidas no momento da coleta através do motorista. As rotas podem ser otimizadas, visando redução de tempo e consequentemente os custos envolvidos no processo.

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram estabelecidos em um objetivo geral e em objetivos específicos, conforme apresentado nas seções 1.3.1 e 1.3.2 , respectivamente.

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de otimização de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos no município de Palmas, especificamente na Quadra 405 Norte.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral apresentado possa ser atingido, foram prescritos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento de como é efetuado os roteiros de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos no município de Palmas.
- Avaliar as teorias e ferramentas disponíveis aplicadas no planejamento de roteiros de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos.
- Propor a otimização de roteiros de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos, visando a redução de custos e do tempo, que envolvem o processo dentro do sistema de gerenciamento da limpeza urbana.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentadas as definições e classificações dos resíduos sólidos urbanos, juntamente com a descrição dos sistemas de gestão de resíduos sólidos, com especial ênfase na coleta de resíduos sólidos urbanos, que é o objeto de estudo deste trabalho.

2.1 Resíduos sólidos urbanos

Resíduos Sólidos são materiais heterogêneos, ou seja, resíduo que possui diversas origens e características. Pode ser encontrado em estado sólido e semissólido, provenientes de atividades humanas e da natureza. Segundo a Lei 12.305 (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto a origem, como Resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos do comércio e prestadores de serviço, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, resíduos de serviço de transportes e resíduo de mineração.

Os resíduos também podem ser classificados em relação a sua periculosidade. Os resíduos perigosos, sendo aqueles que possuem características que causam risco a saúde humana ou ao meio ambiente, como por exemplo, a corrosividade, inflamabilidade, patogenicidade etc. E não perigosos, como sendo aqueles que não apresentam risco.

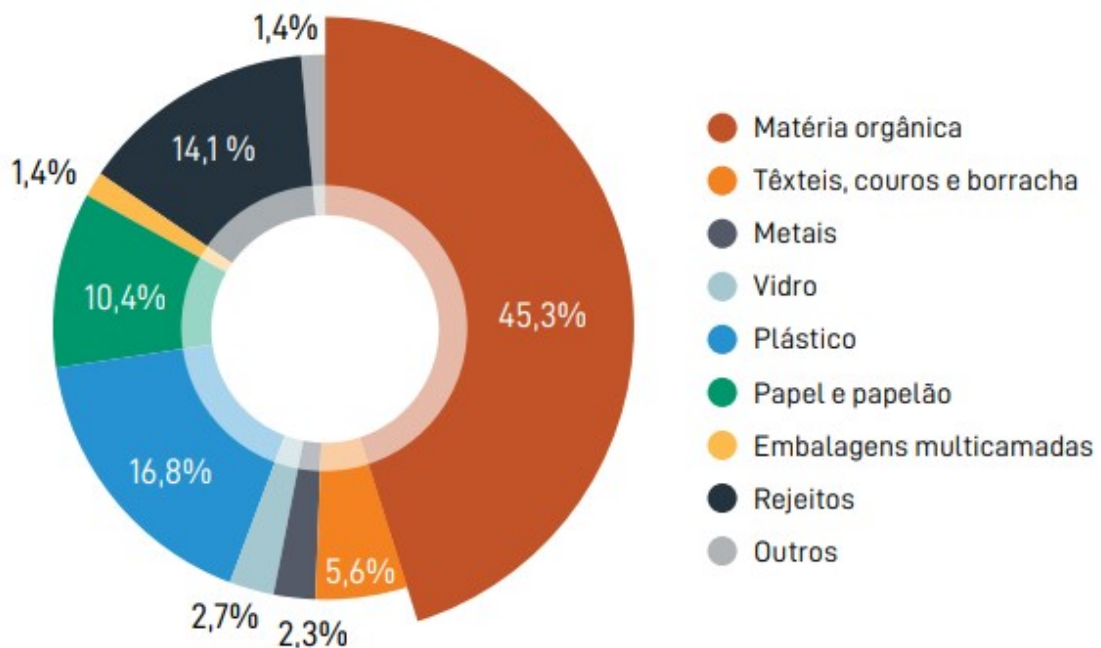
De acordo com a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004), Resíduos denominados como perigosos, são definidos como classe I. Resíduos não perigosos classes II; Resíduos classe II A- Não inertes, nos quais são aqueles que possuem propriedades como solubilidade em água e biodegradabilidade. Resíduos Classe II B- Inertes, sendo aqueles que não são solúveis.

A Fundação Nacional de Saúde FUNASA (2014) afirma que os resíduos sólidos em geral, são formados por substâncias de fácil degradação, como sobras de comidas, podas de árvores e animais mortos; resíduos de moderada degradação, como papéis e papelão; resíduos de difícil degradação, como tecidos, plásticos, borrachas e madeiras e resíduos não degradáveis, como vidros, pedras e cerâmicas.

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) podem ser definidos como, aqueles que possuem origem advinda do uso doméstico, gerados nas residências urbanas e em todo o ambiente urbano, como a varrição e limpeza de ruas da cidade. Além do mais, de acordo com a Lei 14.026 (BRASIL, 2020), os resíduos que se originam de atividades industriais, comerciais ou em que a responsabilidade não cabe ao gerador do resíduo, é também considerado resíduo sólido urbano.

A Figura 1, extraída de (ABELPE, 2020), realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), revela a composição gravimétrica de resíduos sólidos Urbanos no Brasil. Na qual mostra que cada pessoa produz e descarta aproximadamente 170 kg de material orgânica por ano e revela que em 2020 foram descartados mais de 13,35 milhões de toneladas de plástico. Além disso, é visível que a maior parte do lixo é composta por matéria orgânica.

Figura 1 – Gravimetria de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil (2020).



Fonte: Abelpe (2020)

2.2 Sistema de Gestão dos Resíduos Sólidos

A problemática relacionada ao lixo pode apresentar uma grande variação de acordo com a localidade, estado, município e cidade, como afirmado por Rosa (2015). Mesmo em áreas com baixos índices de geração de resíduos, é importante desenvolver e aplicar mecanismos de gestão e otimização desses sistemas, uma vez que o acúmulo inadequado de lixo pode acarretar diversos problemas para a população local.

À medida que as cidades crescem, a produção e os problemas relacionados ao lixo aumentam proporcionalmente. De acordo com Rosa (2015), as dificuldades geradas pelo lixo decorrentes do aumento populacional fazem com que os resíduos sejam dispostos de forma mais

aleatória, devido à ocupação desordenada de alguns pontos da cidade. Além disso, segundo o autor, podem surgir muitas adversidades entre a origem e o destino dos resíduos, impondo condições sanitárias de risco às comunidades, pois haverá produção de rejeitos e sobras que irão contaminar a água, o solo e o ar, causando sérios riscos à saúde da população. Portanto, é necessário adotar medidas adequadas de gestão de resíduos para minimizar esses problemas e proteger a saúde pública.

Carvalho Carvalho (2001) destaca a importância de considerar o lixo como um grande problema sanitário, capaz de gerar diversos danos à saúde pública e ao meio ambiente. Diante desse cenário, é fundamental adotar medidas para minimizar os impactos provocados pela produção de resíduos, tais como um gerenciamento efetivo que inclua a implementação de etapas bem planejadas e estruturadas. Somente dessa forma será possível garantir a redução dos impactos ambientais, a preservação da saúde pública e a sustentabilidade das atividades econômicas.

2.2.1 Produção e geração de resíduos sólidos

À medida que ocorrem mudanças sociais e econômicas, o comportamento da geração de resíduos sólidos é diretamente afetado. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABELPE, 2022), em 2022 foram geradas cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos no país, o que equivale a aproximadamente 224 mil toneladas diárias. O panorama também revela que cada brasileiro produziu, em média, cerca de 1,043 kg de resíduos por dia. Esses dados destacam a importância de sistemas eficientes de gestão de resíduos, já que o descarte inadequado pode causar impactos econômicos, sociais e ambientais significativos.

É importante ressaltar que o planejamento de políticas públicas para a gestão de resíduos sólidos deve ser considerado em nível local e regional. Cada região ou município possui particularidades e necessidades específicas, que devem ser levadas em conta no planejamento e implementação de sistemas de gestão de resíduos. O uso de indicadores, como a taxa de cobertura, é fundamental para avaliar a eficiência dos sistemas de gestão e promover melhorias contínuas.

De acordo com dados divulgados pela Abelp (2022), a região sudeste do Brasil é a que mais gera resíduos, totalizando cerca de 111 mil toneladas diárias, o que representa praticamente 50% da geração total do país. Por outro lado, a região Centro-oeste é a que menos produz resíduos, correspondendo a aproximadamente 7% do total, ou seja, cerca de 6 milhões de

toneladas por ano. Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins (SEMARH/TO, 2017) a taxa de cobertura do Estado do Tocantins é de 96,3%. Essa taxa é calculada a partir da relação entre a massa de resíduos coletados por habitante por dia e o índice de geração *per capita* (vide Figura 2).

Figura 2 – Estimativa de geração de resíduos por população.

Faixa populacional (para a população total)	Até 5.000 habitantes	De 5.001 a 25.000 habitantes	De 25.001 a 100.000 habitantes	Acima de 100.001 habitantes
Índice <i>Per Capita</i> de Geração de RSU – para a população urbana (kg/hab/dia)	0,50	0,53	0,59	0,78

Fonte:SEMARH/TO (2017)

2.2.2 Acondicionamento

O acondicionamento dos resíduos sólidos constitui a etapa inicial e crucial do processo de gerenciamento dos mesmos. De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (Funasa), acondicionar os resíduos de maneira adequada é essencial para garantir a higiene e limpeza dos locais de armazenamento. Para tanto, recomenda-se o uso de recipientes rígidos, tais como baldes de plástico, latas, tambores, contêineres ou sacos plásticos (BRASIL, 2019b).

No entanto, antes de escolher o tipo de acondicionamento mais apropriado, é necessário levar em consideração as características do lixo, como o seu teor de umidade e a presença de materiais cortantes, perfurocortantes ou com pontas agudas. Além disso, a quantidade de resíduos gerados e o tempo de espera até a coleta também devem ser considerados na escolha do método de acondicionamento mais adequado.

De acordo com a Funasa, é recomendado que os lixos domésticos sejam acondicionados em sacos plásticos, de forma fechada e em perfeito estado de higiene, ou em recipientes com fechamento adequado que devem ser lavados regularmente. É importante destacar que, caso o lixo contenha materiais cortantes, perfurocortantes ou com pontas agudas, estes devem ser bem envoltos a fim de proteger os coletores e garis (BRASIL, 2019b).

A etapa de acondicionamento dos resíduos sólidos é de suma importância, pois seu inadequado manuseio pode gerar poluição ambiental e oferecer riscos à população. O lixo pode conter agentes patogênicos e microrganismos prejudiciais à saúde humana, além de atrair insetos

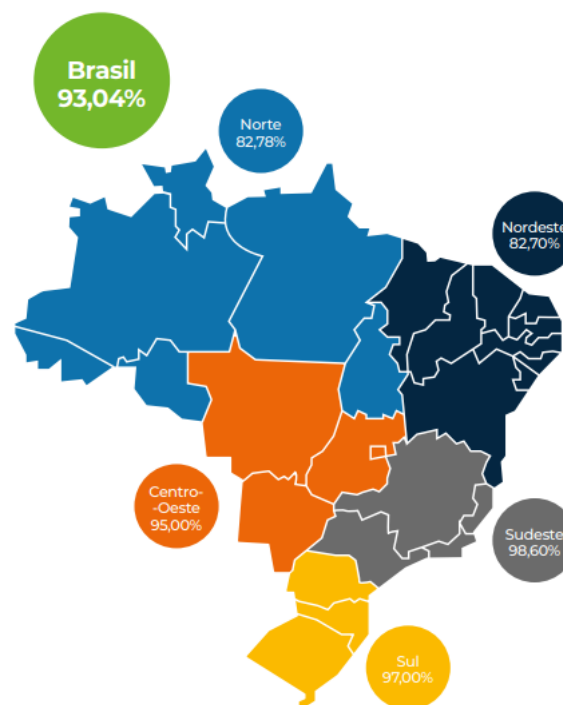
e roedores que podem causar prejuízos à saúde pública. Além disso, o mal acondicionamento do lixo pode dificultar a coleta.

2.3 Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com a NBR 12980, (ABNT, 1993), a coleta de lixo é definida como a coleta de resíduos gerados em residências, comércio e indústrias, desde que não ultrapasse o limite previsto pela legislação municipal. Essa etapa requer um planejamento cuidadoso e depende do correto acondicionamento do lixo. A coleta é realizada pelo serviço público municipal e é muito visível para a população.

Conforme a Abelpe (2022), no Brasil foram coletadas 76,1 milhões de toneladas de RSU, o que representa uma taxa de cobertura de 93%. As maiores taxas de cobertura foram observadas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, que apresentam índices acima da média nacional. Por outro lado, as regiões Norte e Nordeste apresentam uma taxa de cobertura de apenas 83%, o que significa que algumas partes da população não têm acesso a um serviço regular de coleta de resíduos sólidos.

Figura 3 – Índice de coleta de RSU no Brasil em 2022.



Fonte: Abelpe (2022)

A fim de garantir a efetividade da coleta de lixo, é dever do poder público assegurar que

todos os cidadãos sejam contemplados pelo serviço e que este seja realizado de forma periódica e regular, isto é, os veículos coletores devem realizar coletas frequentes nos mesmos locais e dias.

2.3.1 Transporte

De maneira geral, o transporte de resíduos exige o uso de veículos mecânicos para levá-los desde o local de sua geração até o destino final. Diferentes tipos de veículos podem ser empregados para essa finalidade, variando de modelos mais simples a mais avançados tecnologicamente. A NBR 12980 estabelece as especificações para os veículos utilizados no transporte de resíduos até sua destinação final (ABNT, 1993).

De acordo com a norma NBR 12980, os Coletores Convencionais Tipo Prefeitura são os veículos mais comuns utilizados para transporte de resíduos sólidos (ABNT, 1993). Esses veículos possuem carroceria metálica fechada, sem sistema de compactação, e têm formato retangular com tampa escorrediça abaulada, conforme ilustrado na Figura 4. Esses coletores são utilizados para coleta de resíduos domiciliares e comerciais, e podem ter capacidade de carga que varia entre 5m³ e 20m³.

Figura 4 – Coletor convencional sem compactação.



Fonte: Palmas (2020)

Além dos Coletores Convencionais deste tipo a Prefeitura dispõe de veículos com carroceria fechada que possuem dispositivos mecânicos ou hidráulicos para compactar os resíduos em seu interior. Esse processo pode ser contínuo ou intermitente e o carregamento pode ser feito pela parte traseira ou lateral do veículo. Um benefício desse tipo de transporte é que a descarga

pode ser realizada sem contato manual com o resíduo. A norma NBR 12980 (ABNT, 1993) se refere a esses veículos como coletores compactadores, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Coletor convencional com compactação.



Fonte:Palmas (2020)

Segundo Carvalho (2001), os caminhões coletores compactadores são os mais utilizados para a coleta domiciliar, pois a compactação dos resíduos permite que o caminhão recolha mais lixo em uma única viagem, o que reduz o número de viagens necessárias para coletar todo o lixo de uma determinada região, além de diminuir os custos com combustível, manutenção dos veículos e a emissão de poluentes. Além disso, a prensa hidráulica permite que os resíduos sejam compactados de forma mais eficiente, ocupando menos espaço e facilitando o transporte e o descarte.

Anteriormente à concepção dos veículos compactadores, os veículos de coleta de lixo sem compactação eram utilizados. Embora esses veículos apresentassem um custo inicial inferior, a relação custo-benefício não era vantajosa, visto que a capacidade de coleta desses veículos era menor e, para esvaziar os contêineres de lixo, era necessário elevá-los à altura da caçamba, o que consumia mais tempo no processo de coleta. Atualmente, os veículos sem compactação são empregados na coleta de móveis, entulhos de construção ou outros materiais separados, como galhos de árvores e materiais recicláveis, e podem ser utilizados em áreas rurais ou em municípios com pouca população.

2.3.2 *Disposição Final*

A disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos é uma questão crucial para a preservação ambiental e a saúde pública. Dentre as diversas opções existentes para o descarte final do lixo, o aterro sanitário se destaca como a melhor alternativa, devido às suas características e eficácia comprovadas. A prática de disposição final de resíduos em lixões ainda é adotada em algumas regiões, no entanto, é uma forma inadequada de lidar com os resíduos sólidos urbanos. Os lixões são fontes de proliferação de vetores que transmitem doenças à população, além de gerar gás metano que pode ser letal se inalado em grandes quantidades. Além disso, a presença de lixões contribui para a degradação da paisagem e outros problemas ambientais. Portanto, a adoção de alternativas mais adequadas, como o aterro sanitário, é fundamental para minimizar os impactos negativos da disposição inadequada de resíduos sólidos.

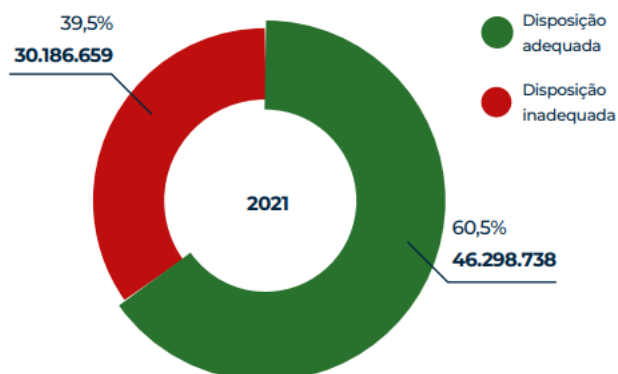
O aterro sanitário consiste em um local especialmente preparado para receber os resíduos sólidos urbanos. Ele é construído de forma a minimizar os impactos ambientais e sanitários do descarte inadequado dos resíduos. O principal objetivo do aterro sanitário é confinar os resíduos em camadas, cobrindo-os com material inerte, geralmente uma camada de solo. Isso reduz significativamente os riscos à saúde pública e à segurança das pessoas.

Além disso, os aterros sanitários possuem sistemas de drenagem e coleta de gases produzidos pela decomposição do lixo, como o metano, que é altamente inflamável e contribui para o efeito estufa. Esses gases são capturados e podem ser tratados e utilizados para geração de energia elétrica, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a redução dos impactos da atividade humana no meio ambiente.

Conforme informações do Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (ABELPE, 2022), a maioria dos RSU coletados, aproximadamente 61%, são destinados aos aterros sanitários, o que corresponde a 46,4 milhões de toneladas de lixo dispostos adequadamente. Porém, a outra face dessa realidade é que 39% dos resíduos coletados em 2022 ainda têm destino final inadequado em lixões e aterros controlados, totalizando 29,7 milhões de toneladas de resíduos com disposição final inapropriada.

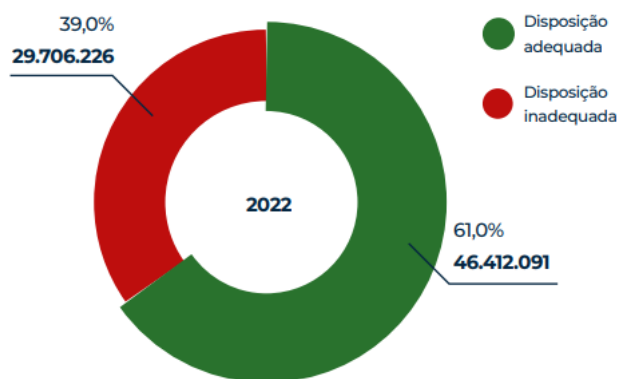
Ao estabelecer uma comparação entre os anos de 2021 e 2022, referente à destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, de acordo com o Panorama dos resíduos sólidos no Brasil (ABELPE, 2022), observa-se um ligeiro aumento na destinação adequada, o que representa um avanço na redução da destinação inadequada, como evidenciado pelas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Comparativo entre a disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2021 (t/ano e %)



Fonte:Abelpe (2022)

Figura 7 – Comparativo entre a disposição final adequada e inadequada de RSU no Brasil em 2022 (t/ano e %)



Fonte: Abelpe (2022)

2.4 Coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Palmas

Situada na região norte do Brasil, a cidade de Palmas é a capital do estado do Tocantins, é considerada como uma cidade de porte médio. A gestão do sistema de coleta e transporte de resíduos em Palmas é de responsabilidade da prefeitura do município, mais especificamente pela secretaria municipal de infraestrutura e serviços públicos. Para a execução desses serviços, a prefeitura terceiriza os serviços para uma empresa privada. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2021), o sistema de coleta atende a totalidade da população da cidade, com coleta regular realizada pelo menos uma vez durante a semana.

De acordo com os dados fornecidos pelo Sistema Nacional de informação sobre a gestão dos resíduos sólidos (BRASIL, 2019a), constata-se que a cidade de Palmas apresenta um custo

médio de R\$111 por habitante para o manejo de resíduos, e que os custos com os agentes executores e empresas privadas de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos totalizam aproximadamente R\$33 milhões. É importante destacar que, mesmo com um custo relativamente alto, o município de Palmas vem cumprindo com sua responsabilidade em relação à gestão de resíduos sólidos, o que é evidenciado pela coleta regular de lixo que atende a 100% da população, além da existência de um aterro sanitário que permite a disposição final correta dos resíduos coletados.

2.5 Proposta de solução para coleta de resíduos sólidos urbanos

A elaboração de um planejamento eficiente para a coleta de RSU é um processo crucial para a redução dos custos associados a este serviço. Tal planejamento deve levar em consideração não apenas a distância percorrida, mas também a capacidade de carga dos veículos, a demanda de cada região atendida e a frequência necessária de coleta. Além disso, o uso de tecnologias de monitoramento em tempo real da frota é essencial para otimizar a rota e identificar possíveis problemas durante o trajeto.

De acordo com Carvalho (2001), em áreas extensas, pode ser realizado o macro roteamento, que corresponde a divisão total da área de coleta, com rotas dimensionadas a representar um dia de trabalho para a equipe coletora. A extensão de cada rota dependerá da quantidade de lixo coletada em cada parada, distanciamento de cada parada e condições do tráfego.

Com base nas rotas definidas pelo macro roteamento, é possível estabelecer caminhos mais específicos para as equipes e veículos em cada dia de coleta. Essa etapa é conhecida como micro roteamento e pode ser utilizado para corrigir possíveis falhas identificadas no macro roteamento.

O planejamento adequado das rotas de coleta de resíduos sólidos traz diversos benefícios para o serviço prestado. Além de garantir a cobertura total das vias, permite uma melhor fiscalização e supervisão, já que as rotas são previamente determinadas e os responsáveis pelo serviço conseguem encontrar as equipes de forma mais rápida.

Outro aspecto importante é a otimização das rotas, que pode ser alcançada por meio de testes, ajustes e revisões, com a colaboração e experiência dos motoristas. Isso possibilita reduzir o tempo e o custo do serviço, aumentando a eficiência e a qualidade do trabalho prestado. Ademais, com o planejamento das rotas é possível evitar a sobrecarga em algumas regiões e a falta de atendimento em outras, proporcionando um serviço mais justo e equilibrado.

2.5.1 Modelagem do problema de coleta dos resíduos sólidos urbanos

A modelagem do problema de rotas de coleta de resíduos sólidos é uma tarefa complexa que requer um conhecimento profundo das ferramentas e métodos disponíveis. É importante conhecer as teorias que descrevem o problema das rotas, bem como os algoritmos de otimização, para que se possa escolher a melhor abordagem para cada caso específico.

Entre as ferramentas disponíveis para modelar o problema de roteamento, destaca-se o uso de Sistemas de Informações Geográficas (GIS), que permitem a análise espacial das informações e a visualização dos dados em mapas. Esses sistemas são úteis na identificação dos pontos de coleta, no cálculo das distâncias percorridas, na análise de congestionamentos de trânsito e na identificação de áreas com maior demanda de coleta (RIZVANOĞLU *et al.*, 2020).

Malakahmad *et al.* (2014) utilizam o GIS para otimizar cinco rotas na cidade de Ipoh situada na Malásia. Neste trabalho, os autores tem como objetivo minimizar a distância percorrida no trajeto de coleta de RSU e também destacam que a administração da cidade gasta cerca de 50% a 70% dos recursos financeiros disponíveis para o gerenciamento do RSU na fase de coleta. Os resultados alcançados por Malakahmad *et al* reduziu em cerca de 22% a distância percorrida no processo de coleta do RSU.

Vu *et al.* (2019) desenvolveram uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de estimar a quantidade de lixo reciclável e não reciclável (RSU) produzido na cidade Austin no estado do Texas nos EUA. Baseado na estimação da quantidade de RSU estimada pela RNA elaborada e no modelo do Problema de Roteamento de Nós, os autores, propõe uma solução para o problema de coleta de lixo reciclável e não-reciclável com uma rota, em média, 19,9% menor em comparação com a rota não modificada. Ainda, neste estudo, vale ressaltar que a coleta seletiva e a de RSU pode ser realizada por caminhões distintos ou por um caminhão que possui dois compartimentos, sendo um para cada tipo de coleta. No caso do caminhão misto embora haja redução na trajetória e nas emissões de gases do efeito estufa há um acréscimo no tempo total para realização da rota otimizada .

O Problema de Roteamento de Nós é definido como um problema de determinação de um caminho no qual necessita passar todos os consumidores (representados como nós) dispensando a menor distância ou tempo possível, executados pelo menor número possível de veículos e respeitando a capacidade de cada um (LIANG *et al.*, 2022).

De acordo com Liang *et al.* (2022) oos problemas de roteamento de coleta de lixo são uma extensão dos problemas de roteamento de veículos. Um número crescente de artigos tem

aplicado algoritmos de otimização heurística para resolver esses problemas. Dos 35 artigos analisados, 29 utilizaram abordagens heurísticas, 3 combinaram técnicas de GIS e algoritmos heurísticos, e os outros 3 aplicaram exclusivamente GIS. Neste estudo, foram abordados vários problemas solucionados. Um deles envolveu a utilização do algoritmo caótico PSO, o qual resultou em um aumento na quantidade total de resíduos coletados, porém com uma maior distância de tempo operacional. Outro problema abordado foi a otimização utilizando a colônia de formigas (ACO), onde a distância permaneceu inalterada, mas o número médio de visitas melhorou em cerca de 68,97% .

Além disso, o uso de softwares de otimização de rotas pode ajudar a resolver o problema de maneira eficiente, levando em conta as diversas variáveis que influenciam a coleta de resíduos, como a capacidade de carga dos veículos, a demanda de cada região e a frequência necessária de coleta. Esses softwares podem gerar soluções otimizadas em um curto espaço de tempo, o que permite uma gestão mais eficiente do serviço de coleta de resíduos sólidos.

Outra importante etapa na modelagem do problema é a validação dos resultados obtidos, que deve ser realizada por meio de monitoramento da frota e dos pontos de coleta. Esse monitoramento pode ser feito por meio de tecnologias como GPS, sensores de carga e câmeras de monitoramento, que permitem o acompanhamento em tempo real do serviço de coleta e a identificação de problemas que possam surgir durante o percurso das equipes. Por fim, é importante ressaltar que a modelagem do problema de coleta de resíduos sólidos deve ser vista como um processo contínuo, que requer a revisão e atualização constante das rotas e dos métodos utilizados, visando sempre a melhoria da eficiência e qualidade do serviço prestado à população.

2.5.1.1 Ferramentas para a solução do problema

O processo de otimização de roteiros pode ser beneficiado com o uso de diversas ferramentas matemáticas, que possibilitam a solução de problemas complexos. Além disso, há uma ampla gama de autores que desenvolveram estudos e pesquisas sobre mecanismos e programas que podem ajudar a solucionar esse questionamento.

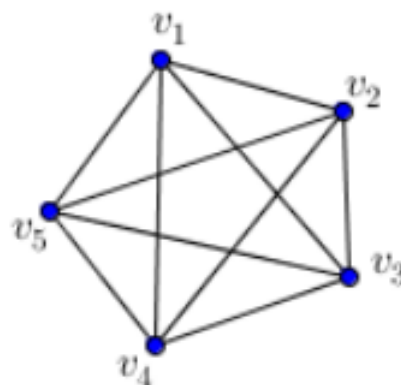
Dentre os métodos matemáticos, existem aqueles que podem ser realizados manualmente e outros que são realizados por meio de programas que utilizam princípios matemáticos avançados, como algoritmos genéticos, heurísticas, programação linear e teoria dos grafos. Esses programas conseguem solucionar problemas complexos em um curto espaço de tempo, possibilitando uma otimização significativa das rotas de coleta de resíduos sólidos. Além disso,

a utilização dessas ferramentas matemáticas pode trazer diversos benefícios para as empresas de coleta de resíduos, como redução de custos, otimização do tempo de coleta, melhoria na qualidade do serviço prestado, além de contribuir para a sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

O conceito de grafo deve ser compreendido pois será utilizado na resolução do problema. Por isso, em matemática e ciência da computação, um grafo é uma estrutura abstrata que representa um conjunto de objetos, denominados vértices ou nós, e as relações entre eles, chamadas de arestas. Esses objetos podem representar entidades como cidades, pessoas, páginas da web, moléculas e outras. As arestas do grafo podem ser direcionadas, ou seja, apontar de um vértice para outro, ou não direcionadas, sem especificar uma direção. Os grafos são utilizados extensivamente em diversas áreas, incluindo ciência da computação, matemática discreta, redes sociais, teoria dos grafos e análise de redes.

Um grafo euleriano, segundo Brito (2014), pode ser definido como um grafo que contém um circuito euleriano, ou seja, um circuito que passa por todas as arestas do grafo exatamente uma vez e retorna ao vértice de partida, (Figura 8). Um circuito euleriano é também chamado de ciclo euleriano. Um grafo é euleriano se e somente se todos os seus vértices possuem grau par, ou se o grafo é desconexo e cada componente conexo possui um ciclo euleriano. Os grafos eulerianos recebem esse nome em homenagem ao matemático suíço Leonhard Euler, que propôs a solução para o problema das pontes de Königsberg em 1736, mostrando que o problema só tinha solução se o grafo associado fosse euleriano. Desde então, a teoria dos grafos eulerianos tem sido amplamente estudada e aplicada em várias áreas.

Figura 8 – Grafo euleriano



Fonte: Brito (2014)

2.5.1.2 *Problema do carteiro chinês*

O trabalho de um carteiro é receber as correspondências em sua central de correios, entregar nas residências e retornar a central. Em seu trabalho ele deve entregar em cada rua na sua área pelo menos uma vez. Com essa limitação, ele deve percorrer sua entrega no menor caminho possível. O matemático chinês Kwan Mei-ko (1962), denominou pela primeira vez o problema, ele então ficou conhecido como o Problema do Carteiro Chinês (PCC).

O problema do carteiro chinês é um problema matemático clássico que consiste em encontrar o menor caminho que um carteiro deve percorrer para passar por todas as ruas de uma cidade ou bairro pelo menos uma vez, retornando ao ponto de partida. O problema é conhecido por sua dificuldade em encontrar uma solução ótima em um tempo razoável, especialmente quando a cidade tem muitas ruas ou quando as ruas possuem direções diferentes.

O PCC tem várias aplicações práticas, como por exemplo na otimização de rotas para entregas ou coletas de mercadorias, na definição de circuitos elétricos e de telecomunicações, entre outros. Existem várias abordagens matemáticas para resolver o problema, como o método de busca heurística, o algoritmo de busca em profundidade e o método de programação linear.

Embora seja um problema desafiador, o problema do carteiro chinês tem uma importância significativa em diversas áreas, principalmente no planejamento de logística e transporte. A solução eficiente desse problema pode resultar em economias significativas de tempo e dinheiro para empresas de logística e transporte. O PCC pode ter diversas variações de acordo com a natureza de rede, segundo Moro (2014) pode ser classificado como:

- Problema do carteiro chinês não direcionado (PCCND), no qual o objetivo é encontrar o caminho mais curto para percorrer todas as arestas de um grafo não direcionado, passando por cada aresta uma única vez e retornando ao ponto de partida. Esse problema é NP-completo, o que significa que não existe um algoritmo eficiente para resolver todas as instâncias do problema em tempo polinomial. No entanto, existem algoritmos heurísticos capazes de encontrar soluções aproximadas para o problema. Um exemplo de sua aplicação é em cidades com ruas de mão dupla.
- Problema do carteiro chinês direcionado (PCCD), é uma variação do problema do carteiro chinês em que todas as arestas do grafo são percorridas, mas agora existe um vértice de origem e um vértice de destino que devem ser especificamente visitados. É uma versão mais restrita do problema, mas ainda bastante útil na otimização de rotas. Neste problema, o objetivo é encontrar o caminho mais curto que percorre todas as arestas do grafo, começa

no vértice de origem e termina no vértice de destino. Novamente, as restrições garantem a continuidade da rota, mas agora há um destino final específico. Um exemplo de sua aplicação é em cidades somente com ruas de mão única.

- Problema do carteiro chinês misto (PCCM), O Problema do Carteiro Chinês Misto é uma variação do Problema do Carteiro Chinês que considera tanto arestas não direcionadas quanto direcionadas no grafo. Essa variação ocorre quando as ruas ou vias que compõem a rede de coleta de resíduos sólidos apresentam trechos de mão única e trechos de mão dupla. Dessa forma, é necessário determinar o menor caminho para percorrer todas as ruas do grafo, levando em conta as direções e restrições de sentido das vias. Além disso, é preciso considerar que algumas ruas podem ser percorridas mais de uma vez, devido a restrições de sentido e sentido contrário. O objetivo desse problema é encontrar o caminho mais curto e eficiente para percorrer todas as ruas da rede, minimizando a distância total percorrida e atendendo às restrições impostas.

De maneira geral, os problemas que envolvem o PCC, podem ser solucionados transformando o grafo original em euleriano, para cada situação classificados acima.

3 METODOLOGIA

A otimização de rotas na coleta de lixo é um tema importante que tem sido estudado em diversos contextos. Para abordar essa questão, é necessário adotar uma metodologia que permita a coleta de dados e a caracterização da pesquisa. Além disso, é importante levar em consideração as características específicas do local onde a coleta será realizada, como a topografia, a densidade populacional, a infraestrutura de transporte e a disposição dos resíduos. Todos esses fatores podem afetar a eficiência da coleta de lixo e, conseqüentemente, a otimização das rotas.

No presente capítulo, será detalhada a metodologia adotada para abordar a otimização de rotas da coleta de lixo. Será explicado como foram coletados os dados e caracterizada a pesquisa, com o intuito de encontrar soluções para o problema em questão.

3.1 Área de estudo

O município de Palmas foi instituído em 20 de maio de 1989 e teve sua instalação oficial no dia 1º de janeiro de 1990, após a mudança da capital provisória do Tocantins, que era Miracema. Segundo dados do IBGE (2010), Palmas está situada na região central do Estado do Tocantins, especificamente na mesorregião oriental do estado, pertencente à microrregião de Porto Nacional e integrante da região norte do Brasil (vide Figura 9). O município possui uma área territorial de 2.227,34 km².

3.1.1 População

Palmas é a capital do estado do Tocantins e o município mais populoso do estado. De acordo com dados preliminares do Censo 2022, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), sua população é de 334.454 habitantes. Segundo o SNIS (BRASIL, 2021), a população urbana é de aproximadamente 304.305 habitantes. Desde o último censo realizado em 2010, a população cresceu cerca de 46,48%, tornando Palmas a capital que mais cresceu nos últimos 12 anos. A densidade demográfica do município, segundo (IBGE, 2010), é de 102,90 hab/km², sendo considerada a menor entre as capitais brasileiras.

Figura 9 – Localização de Palmas



Fonte: Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas-TO (2014)

3.1.2 Geração per capita de Resíduos sólidos urbanos

De acordo com o SNIS (BRASIL, 2021), a geração de resíduos sólidos no município de Palmas é de 1,53 kg/habitante/dia. Essa quantidade engloba os resíduos domiciliares e públicos por pessoa, levando em consideração toda a população atendida pelo serviço de coleta. Já a geração de resíduos sólidos urbanos é de 1,58 kg/hab/dia, correspondendo aos resíduos domiciliares e públicos per capita em relação à população urbana.

3.1.3 Coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos em Palmas

A Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos é a responsável pelo manejo dos resíduos sólidos em Palmas. De acordo com o SNIS (BRASIL, 2021), a coleta regular de resíduos sólidos domésticos atinge uma cobertura total de 100% em relação à população total do município, bem como em relação à população urbana. Em relação à coleta domiciliar indireta (porta a porta) da população urbana, a cobertura alcançou 84,54% da população.

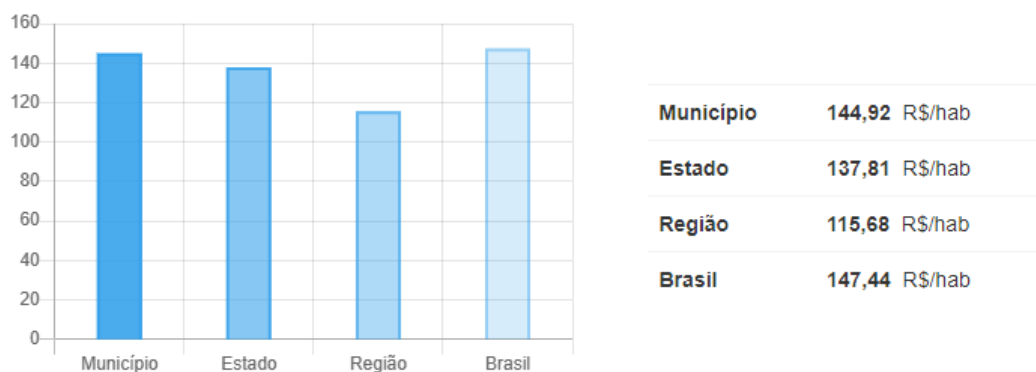
A empresa responsável pela coleta e transporte de resíduos urbanos no município de Palmas é a M Construções e Serviços Públicos Ltda, popularmente conhecida como MB Limpeza Pública. Além disso, ela também é responsável por serviços como coleta de lixo hospitalar,

varrição de ruas, recolhimento de galhadas, animais mortos e outros serviços que envolvem a limpeza pública.

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

Conforme informações do SNIS (BRASIL, 2021), o gasto médio por habitante urbano com o manejo de resíduos sólidos em Palmas foi de R\$ 144,92 por ano, (Figura 10). Esse valor equivale a mais de 45 milhões de reais gastos no total, considerando toda a população urbana atendida pelo serviço de coleta. Essa despesa representa cerca de 3,2% das despesas correntes da prefeitura ao longo de todo o ano, incluindo todos os serviços oferecidos pelo município.

Figura 10 – Despesas com manejo de resíduos sólidos urbanos per capita.



Fonte: Brasil (2021)

De acordo com os dados fornecidos pela SINIR (BRASIL, 2019a) em 2019, os custos relacionados à coleta de resíduos sólidos no município de Palmas foram de R\$ 145,63 por tonelada (Figura 11). Esse valor corresponde a um total de mais de R\$ 15 milhões. Considerando tanto os agentes executores públicos quanto privados envolvidos na prestação desse serviço, os custos totais ultrapassaram os R\$ 32 milhões.

Figura 11 – Custos anuais com 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: Brasil (2019a)

3.2 Caracterização da coleta de resíduos sólidos em Palmas

A coleta e transporte de resíduos é uma atividade fundamental para a saúde pública e a qualidade de vida da população. É necessário um planejamento adequado para garantir a eficácia e regularidade desse serviço, incluindo a definição de rotas, frequências de coleta, tipos e quantidade de veículos, equipes e horários. Um sistema bem planejado e gerenciado contribui significativamente para a redução de doenças relacionadas ao lixo e para a manutenção da ordem da cidade. Além disso, uma coleta eficiente e regular também é importante para minimizar os impactos ambientais causados pela disposição inadequada dos resíduos.

3.2.1 Frequência

Conforme informações oficialmente divulgadas pela Prefeitura de Palmas, a coleta de resíduos sólidos urbanos é realizada de segunda a sábado nas quadras comerciais principais e em pontos de grande aglomeração de pessoas, tais como a Rodoviária e as Secretarias Estaduais situadas na Praça dos Girassóis, conforme descrito na Tabela 1. Este procedimento é fundamental para manter a boa ordem da cidade, contribuindo para reduzir a incidência de doenças relacionadas ao lixo e garantir a satisfação da população em relação à limpeza urbana.

Tabela 1 – Frequência de coleta quadras comerciais e outras.

Coleta em seis dias da semana
ACSU-NE 10 (101 Sul)
ACSU-SE 10 (102 Sul)
ACNO 1 e 11 (103 Norte)
ACSO 1 e 11 (103 Sul)
ACNE 1 e 11 (104 Norte)
ACSE 1 e 11 (104 Sul)
ACSU-SO 20 (201 Sul)
ACSU-SE 20 (202 Sul)
Arse 21 (204 Sul)
Av. Palmas Brasil
Av. T. Segurado (adjacentes)
Av. JK (TO-050 – Palácio Araguaia)
Av. LO-05 (NS-08 a Av. T. Segurado)
Av. LO-27
Av. T. Segurado (LO-05 a LO-04)
Terminal Rodoviário de Palmas
Secretarias estaduais da Praça dos Girassóis

Fonte: Adaptado de Palmas (2021)

Conforme informações veiculadas pela prefeitura de Palmas, o serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos é realizado diariamente, de segunda a domingo, nos locais que abrigam feiras e em algumas avenidas da cidade, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequência de coleta em feiras e quadras.

Coleta em sete dias da semana
Av. I no Jardim Aurenny III
Av. Tocantins (Jardim Aurenny I)
Av. Tocantins (Taquaralto)
Todas as feiras da cidade

Fonte: Adaptado de Palmas (2021)

Conforme a Tabela 3 e 4, em algumas quadras de Palmas, a coleta de resíduos sólidos ocorre em dias alternados, sendo às segundas, quartas e sextas-feiras em algumas, e às terças, quintas e sábados em outras. Além disso, a coleta também é realizada todas as quartas e domingos no bairro Sonho Meu, e às quartas, sextas e domingos na rodovia TO-010, até o quilômetro 31, e na rodovia TO-020, até o quilômetro 32.

Tabela 3 – Coleta em quadras residenciais, loteamentos e vilas

Coleta em três vezes da semana			
Segunda, quarta e sextas-feiras			
Arso 12 (105 Norte)	Arse 32 (306 Sul)	Arno 31 (303 Norte)	Arno 61 (503 Norte)
Arne 12 (106 Norte)	Arno 33 (307 Norte)	Arso 31 (303 Sul)	Arne 61 (504 Norte)
Arse 12 (106 Sul)	Arso 33 (307 Sul)	Arne 41 (304 Norte)	Arse 51 (504 Sul)
Arne 13 (108 Norte)	Arse 33 (308 Sul)	Arno 32 (305 Norte)	Arne 63 (506 Norte)
Arne 14 (110 Norte)	Arno 34 (309 Sul)	Arso 32 (305 Sul)	Arso 53 (507 Sul)
Arse 15 (110 Sul)	Arso 41 (403 Sul)	Arne 64 (508 Norte)	Arso 61 (603 Sul)
ASR-SE 15 (112 Sul)	Arno 41 (403 Norte)	Arso 54 (509 Sul)	Arne 71 (604 Norte)
Arno 21 (203 Norte)	Arne 51 (404 Norte)	Arno 71 (603 Norte)	Arno 72 (605 Norte)
Arse 21 (204 Sul)	Arno 42 (405 Norte)	Arno 42 (405 Norte)	Arso 62 (605 Sul)
Arso 22 (205 Sul)	Arso 42 (405 Sul)	ACSO 101 (1003 Sul)	Arne 74 (606 Norte)
Arse 22 (206 Sul)	Arne 53 (406 Norte)	Arso 102 (1005 Sul)	Arse 72 (606 Sul)
Arno 23 (207 Norte)	Arno 43 (407 Norte)	Arso 103 (1007 Sul)	Arno 73 (607 Norte)
Arso 23 (207 Sul)	Arso 43 (407 Sul)	Arso 111 (1103 Sul)	Arso 63 (607 Sul)
Arne 24 (208 Norte)	Arne 54 (408 Norte)	Arso 112 (1105 Sul)	Ecológico
Arse 23 (208 Sul)	Arno 44 (409 Norte)	Arso 121 (1203 Sul)	Feira da 1206 Sul (Arse 122)
Arse 24 (210 Sul)	Arso 44 (409 Sul)	Arse 121 (1204 Sul)	Feira da 304 Sul (Arse 31)
ASR-NE 25 (212 Norte)	Arso 45 (411 Sul)	Arse 131 (1304 Sul)	Garagem do Estado, Av. NS-10 da LO-04 a Embrapa
ASR-SE 25 (212 Sul)	ASR-SE 45 (412 Norte)	Arse 132 (1306 Sul)	Praia da Graciosa
Arse 141 (1404 Sul)	Palacinho	Clube da Caixa e BB	Secretarias até o Detran
Arse 142 (1406 Sul)	Polinésia	Contêiner	TO-050 da LO-19 ao Dertins
Arso 151 (1503 Sul)	Praia das Arnos	Setor Lago Norte	UFT
Av. LO-27, Av. Tocantins (Taquaralto),	Praia do Prata	TO-010 até Km 28	Vila Militar Exército
Chácara Água Fria	Santo Amaro		Vila Militar Marinha.

Fonte: Adaptado de Palmas (2021)

Tabela 4 – Coleta em quadras residenciais e loteamentos

Coleta em três vezes da semana			
Terças, quintas e sábados			
Arse 101 (1004 Sul)	Lago Sul	Arse 82 (806 Sul)	Setor Santa Fé I, II, III e IV
ASR-SE 105 (1012 Sul)	Lunabel	ARS-SE 85 (812 Sul)	Setor Santa Bárbara
Arse 111 (1104 Sul)	Maria Rosa	Arse 91 (904 Sul)	Setor Santa Helena
Arse 112 (1106 Sul)	Marli Camargo	Arse 92 (906 Sul)	Setor Sul
ASR-SE 115 (1112 Sul)	Morada do Sol I, II e III	ASR-SE 95 (912 Sul)	Setor União Sul
Arse 122 (1206 Sul)	Morada do Vale	Jardim Aurenly I	Sol Nascente (quinta-feira)
Arse 61 (604 Sul)	Setor Aeroporto	Jardim Aurenly II	Taquaralto
ASR-SE 65 (612 Sul)	Setor Universitário	Jardim Aurenly III	Taquari (T-20, T-21, T-22, T-23, T-30, T-31, T-32 e T-33)
Arse 71 (704 Sul)	Setor Belo Horizonte	Jardim Aurenly IV	Taquaruçu
Arse 72 (706 Sul)	Setor Bertaville	Av. NS-10 (LO-27 a LO-13)	Vale do Sol
ASR-SE 75 (712 Sul)	Setor Industrial	Setores Bela Vista	Flamboyant
Arse 81 (804 Sul)	Setor Irmã Dulce	Belo Vale	Recanto das Araras I e II
Distrito Buritirana (quinta-feira)	Loteamento Vitória	Jardim Sônia Regina	
Jardim Bela Vista	Av. LO-05 (NS-08 a T. Segurado)		

Fonte: Adaptado de Palmas (2021)

3.2.2 Rotas

A definição das rotas para coleta de resíduos deve ser um processo bem planejado e meticulosamente mapeado, com pontos de entrada e saída das quadras definidos e todo o trajeto pré-estabelecido. Essa abordagem permite a criação de uma rota inteligente que visa a eficiência e eficácia do processo de coleta de resíduos. Em Palmas, a rota de coleta é de responsabilidade da empresa MB Limpeza Pública.

Durante uma visita à unidade da empresa, ao conversar com o gestor responsável, foi informado que as rotas são definidas pelos próprios motoristas. Ou seja, ao realizar a mesma atividade por vários anos, eles traçaram mentalmente um trajeto que lhes permite realizar a coleta de todas as quadras. Os motoristas são apenas orientados a manter uma velocidade constante e evitar freios bruscos ao chegarem nos pontos de coleta nas residências.

3.2.3 Quantidade e tipos de veículos de coleta de resíduos sólidos urbanos

Conforme informações fornecidas pelo responsável pela gestão da MB Limpeza Pública, a coleta dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Palmas é realizada por meio de caminhões coletores do tipo compactadores. A frota da empresa é composta por 14 veículos, dos quais 10 são trucados e 4 do tipo toco. A Tabela 5 apresenta detalhes sobre as características dos caminhões utilizados, bem como suas respectivas capacidades de carga.

Tabela 5 – Caracterização dos veículos utilizados para coleta de RSU em Palmas

Tipo	Modelo	Quantidade	Capacidade de carga
Trucado	VW 24-280	10	19 m ³
Toco	VW 17-260	4	15 m ³

Fonte: Adaptado de MB (2023)

3.2.4 Equipes de coleta de resíduos

De acordo com informações do responsável pela gestão da MB limpeza pública em Palmas, as equipes responsáveis pela coleta de resíduos sólidos na cidade contam com um total de 88 pessoas, distribuídas em 22 equipes. Cada equipe é composta por um motorista e três coletores, (Figura 12).

Figura 12 – Equipes de coleta.



Fonte: Palmas (2020)

3.2.4.1 Períodos de coleta

De acordo com informações fornecidas pela MB Limpeza Pública, a coleta de resíduos urbanos em Palmas é realizada tanto no período diurno quanto no noturno, com atendimento programado para cada local da cidade, de acordo com os dias definidos para a realização do serviço. Nesse contexto, é importante ressaltar que a empresa conta com 11 equipes para coleta diurna e outras 11 para coleta noturna, totalizando 22 equipes responsáveis pelo serviço.

3.3 Proposta de otimização de roteiro de coleta de resíduos sólidos em Palmas

Com o objetivo de otimizar o processo de coleta de resíduos em Palmas, a quadra 405 norte será utilizada como base. Essa rota é referente a um dia de trabalho realizado no período diurno. O caminhão coletor se dirige para a quadra 405 norte, onde a coleta inicia aproximadamente às 9h45min e termina às 11h35min, totalizando 1 hora e 50 minutos de duração, (Tabela 6). É importante ressaltar que o caminhão iniciará a coleta vazio e chegará à central de armazenamento também vazio.

Tabela 6 – Informações coleta da quadra

QUADRA	INICIO	FIM	PESO PREVISTO (KG)
405 NORTE	09:45	11:35	6500

Fonte: Adaptado de MB (2023)

A coleta de resíduos na quadra 405 norte é realizada por meio de caminhão trucado. Na quadra 405 norte, (Figura 13), a coleta tem início na alameda 8 e termina na alameda 16. Em seguida, o caminhão se desloca para o aterro sanitário, onde ocorre o descarregamento dos resíduos coletados.

Figura 13 – Rota 405 norte



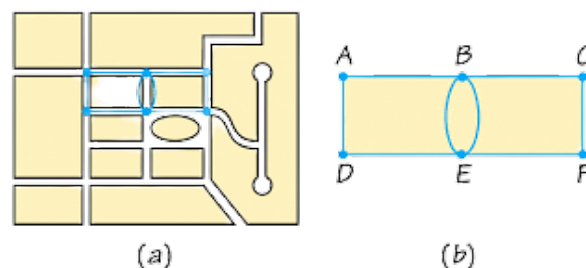
Fonte: MB (2023)

3.3.1 Carteiro Chinês

O objetivo da aplicação da ideia do carteiro chinês na otimização de rotas de coleta de resíduos sólidos consiste em determinar a rota mais adequada para os caminhões coletores percorrerem, tendo em conta as peculiaridades do território e as limitações impostas pela logística de coleta. O algoritmo do carteiro chinês possibilita encontrar o trajeto mais curto e eficiente para percorrer um conjunto de ruas, evitando redundâncias de trajetos e minimizando o tempo e a distância percorrida pelos veículos de coleta. Nesse sentido, é possível aprimorar o processo de coleta de resíduos, reduzir o tempo de deslocamento e os custos operacionais, além de contribuir para a conservação do meio ambiente.

A finalidade subjacente à função do carteiro chinês é a minimização do custo total, ou seja, a redução da distância total percorrida. As limitações estabelecidas asseguram a continuidade da rota, garantindo que nenhuma aresta será ignorada e que as variáveis associadas ao problema sejam inteiras e não negativas.

Figura 14 – Representação do problema do carteiro chinês.



Fonte: Constantino (2012)

3.3.2 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra é uma técnica amplamente utilizada para encontrar o caminho mais curto entre um nó de partida e todos os outros nós em um grafo ponderado, independentemente de ser direcionado ou não. Foi desenvolvido pelo renomado cientista da computação Edsger Dijkstra em 1956. A eficiência do algoritmo de Dijkstra, conforme descrito por Barros *et al.* (2007), depende do número de vértices presentes no grafo.

A essência do algoritmo de Dijkstra é iniciar todas as distâncias dos nós em relação ao nó de partida com um valor infinito, exceto pelo próprio nó de partida, que tem sua distância definida como zero. Além disso, cria-se um conjunto vazio chamado visitados, para armazenar os nós

cuja distância mínima já foram determinadas. O algoritmo então seleciona o nó com a menor distância não visitada e o marca como visitado. Inicialmente, o nó de partida é selecionado como o nó de origem. Além disso, para cada vizinho do nó atual (que é o nó de partida), o algoritmo de Dijkstra calcula uma distância tentativa. Essa distância tentativa é obtida somando a distância do nó atual ao vizinho com a distância acumulada do nó atual até a origem. Se a distância tentativa for menor do que a distância atualmente armazenada para o vizinho, a distância armazenada é atualizada.

Após calcular as distâncias tentativas para todos os vizinhos do nó atual, o algoritmo marca o nó atual como visitado e o remove do conjunto de nós não visitados. O algoritmo termina nas seguintes condições: se o nó de destino já tiver sido marcado como visitado ou se não houver mais nós alcançáveis a partir do nó de partida (ou seja, a distância do próximo nó não visitado é infinita). Caso contrário, o próximo nó com a menor distância não visitada é selecionado como o novo nó atual. Após a execução do algoritmo de Dijkstra, obtemos a distância mínima do nó de partida para todos os outros nós alcançáveis no grafo, bem como o caminho mais curto correspondente para chegar a cada nó.

O algoritmo utilizado para otimizar as rotas de coleta de resíduos sólidos na cidade de Palmas, será o algoritmo Dijkstra, no qual utiliza a ideia da teoria do carteiro chinês. Pois pretende-se que a equipe de coleta, realize toda a cobertura das ruas pelo menos uma vez, percorrendo o menor caminho possível.

A aplicação do algoritmo no problema ocorre encontrando em uma rota fechada, a possibilidade de visitar todas as arestas de um grafo conexo, ao menos uma vez, com o custo menor possível. Se houver necessidade, no caso de ruas fechadas, será necessário passar mais de uma vez por ela.

3.3.3 Bibliotecas utilizadas

Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada, de tipagem dinâmica e multiplataforma. Foi criada por Guido van Rossum e lançada pela primeira vez em 1991. É uma das linguagens de programação mais populares e amplamente utilizadas no mundo. Python possui uma biblioteca padrão extensa que fornece módulos e funções para realizar diversas tarefas comuns, como manipulação de arquivos, trabalhar com mapas e dados geoespaciais, etc.

O Python possui várias bibliotecas, dentre elas existem as que são responsáveis por gerar e manipular mapas. As principais empregadas neste trabalho são o *Folium*, *Geopandas*,

Basemap, *Cartopy* e *Plotly*. A escolha das bibliotecas dependem das necessidades específicas do projeto. O *PyCharm*, pode ser um excelente ambiente de desenvolvimento integrado para desenvolver e explorar projetos que envolvam o uso dessas bibliotecas, pois oferece recursos avançados de edição e depuração de código Python.

A biblioteca utilizada para gerar e tratar mapas em Python foi o *Geopandas*. Essa biblioteca permite trabalhar com dados geoespaciais. Ela suporta leitura, escrita e manipulação de dados geográficos, além de fornecer recursos para plotagem de mapas. O *Geopandas* estende a funcionalidade do *pandas* no qual é uma biblioteca de código aberto para a linguagem de programação Python. O principal objeto de dados fornecido pelo *pandas* é o *DataFrame*. O *DataFrame* é uma estrutura de dados bidimensional semelhante a uma tabela, no qual organiza os dados em linhas e colunas, permitindo o armazenamento, manipulação e análise de dados de forma eficiente.

O *Geopandas* fornece a estrutura de dados chamada de *GeoDataFrame*. O *GeoDataFrame* é basicamente um *DataFrame* do *pandas* com uma coluna especial chamada *geometry*, onde são armazenadas geometrias que representam as informações geoespaciais. Essas geometrias podem ser pontos, linhas, polígonos ou qualquer outra forma espacial.

3.3.4 *Resolução do problema*

Para a aplicação do algoritmo de Dijkstra, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), *PyCharm*. Inicialmente foram importadas as bibliotecas *matplotlib.pyplot*, *networkx*, *osmnx*, *scipy*, *pydot*, *csv* e *os*. A biblioteca *matplotlib.pyplot* é uma ferramenta com a finalidade de visualizar dados e apresenta-los em forma gráfica, ela foi importada como *plt*, para tornar a escrita do código mais simples. A biblioteca *networkx* é utilizada para criar, analisar e visualizar estruturas de redes ou grafos, além do mais oferece recursos de visualização para representar grafos de forma gráfica e interativa. A biblioteca *osmnx* é uma ferramenta utilizada para baixar, analisar, visualizar e modelar redes de ruas (grafos de ruas) a partir de dados do *OpenStreetMap* (OSM), no qual é uma fonte aberta de dados geoespaciais coletados colaborativamente por voluntários de todo o mundo. A biblioteca *scipy* é utilizada para trabalhar com matrizes, realizar operações matemáticas, resolver equações, otimizar problemas, etc. A biblioteca *pydot* é capaz de criar, manipular e renderizar grafos com uma representação visual em diversos formatos de imagem. A biblioteca *csv*, oferece suporte à leitura e gravação de arquivos em formato CSV. A biblioteca *os* permite que os programas Python tenham acesso a várias

funcionalidades específicas do sistema, como manipulação de arquivos, execução de comandos do sistema, etc.

Após a importação das bibliotecas, foi acionada a biblioteca *osmnx*, através do comando *ox.config*, para baixar o mapa da quadra a partir do banco de dados do OSM. Foi configurada então a cidade, estado e país. Em seguida, foram inseridos os pontos de coordenadas aproximadamente do meio da quadra 405 norte e selecionando o raio de cobertura a partir desse ponto.

Logo após, foi utilizado o comando *nx.adjacency_matrix*, da biblioteca *NetworkX*. Ele foi utilizado para obter a matriz de adjacência de um grafo representado por um objeto *Graph* do *NetworkX*. A matriz de adjacência é uma matriz quadrada que representa a relação de adjacência entre os nós de um grafo. Cada elemento da matriz indica se existe uma aresta (ou relação) entre dois nós.

Junto a ele foi utilizado o comando *A.toarray*, pertencente a biblioteca *SciPy*. Ele serve para converter uma matriz esparsa em uma matriz densa (ou seja, uma matriz completa). Em seguida, os comandos utilizados foram para desenhar o grafo. O comando *nx.shell_layout* fornecida pela biblioteca *NetworkX* (*nx*), foi utilizado para posicionar os nós de um grafo em círculos concêntricos (ou camadas), também conhecido como *shell layout*. organiza os nós em anéis concêntricos, onde os nós com maior distância em relação a um nó central estão em anéis mais externos. Os nós que compartilham conexões com o nó central ocuparão o primeiro anel e, à medida que a distância do nó ao nó central aumenta, os nós são dispostos em anéis subsequentes.

Em sequência foram configurados os rótulos, através do comando *nx.get_edge_attributes* fornecida pela biblioteca *NetworkX* (*nx*), no qual permite obter atributos específicos de arestas em um grafo. Em grafos do *NetworkX*, pode-se atribuir informações adicionais às arestas por meio de atributos. Cada aresta pode ter um dicionário de atributos associados a ela. Esses atributos podem representar informações como peso da aresta, tipo de relação, distância entre os nós conectados, entre outras propriedades personalizadas. A função *nx.get_edge_attributes* permite acessar os atributos de um ou mais atributos específicos de todas as arestas do grafo ou de um conjunto selecionado de arestas.

O comando *nx.drawing.nx_pydot.write_dot*, da biblioteca *NetworkX* (*nx*), serve para desenhar o grafo com as posições fornecidas e gravar o grafo em formato DOT, que é um formato de descrição de grafos. O DOT é uma linguagem de especificação de grafos que descreve a estrutura do grafo e suas propriedades. Em seguida, utilizando a biblioteca *OSMnx* é

possível a rede das ruas escolhida, e através da função *ox.plot_graph* é possível desenhar o grafo, especificando o tamanho e as cores dos nós e das linhas.

Para colocar os rótulos nos nós, foi utilizado o comando *ox.graph_to_gdfs*, no qual é uma função da biblioteca *OSMnx (ox)*, que converte um grafo criado com o *OSMnx* em dois objetos do tipo *GeoDataFrame* do *geopandas*. Essa função é muito útil para trabalhar com dados geoespaciais e informações associadas aos elementos do grafo (como nós e arestas) em formato tabular. Os dois objetos *GeoDataFrame* serão o *GeoDataFrame gdf_nodes* que conterá informações como as coordenadas (latitude e longitude) de cada nó do grafo e quaisquer outros atributos associados a eles e *GeoDataFrame gdf_edges* que conterá informações sobre as arestas do grafo, como os nós de origem e destino, a geometria da aresta, comprimento, velocidades de tráfego, entre outros atributos.

Para gerar as arestas foi utilizado o comando *os.path.join*, no qual é uma função da biblioteca padrão do Python. A *os.path*, é usada para concatenar partes de caminhos de diretório ou de arquivo de forma adequada, independentemente do sistema operacional. O *os.path.join* aceita um ou mais argumentos de caminho e os une usando o separador de caminho específico do sistema operacional.

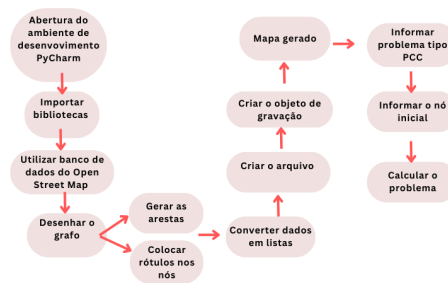
Logo após foi especificado um caminho de salvamento (*save_path*), para armazenar o arquivo no local desejado. Para criar o objeto de gravação, foi utilizado o comando *csv.writer* é uma classe da biblioteca padrão do Python que permite escrever dados em um arquivo CSV (*Comma-Separated Values*). Essa classe é usada em conjunto com a função *open* para criar um objeto que escreve dados em um arquivo CSV de forma eficiente e em conformidade com as regras do formato CSV.

Para garantir que o caminho gerado seja construído de acordo com a estrutura correta do sistema operacional em que o código está sendo executado, foi utilizado o comando *os.path.join*, que é uma função da biblioteca padrão *os* do Python. Em seguida para manipular dados tabulares e salvar informações em formato CSV, foi utilizado o comando *csv.writer*. Essa classe é usada em conjunto com a função *Open* para criar um objeto que escreve dados em um arquivo CSV de forma eficiente e em conformidade com as regras do formato CSV.

Para construir listas dinamicamente à medida que o programa é executado, foi utilizado o comando *.append*. O *.append* é um método que pode ser usado com listas para adicionar um elemento no final da lista, ele é um método usado para adicionar elementos a uma lista em Python. Logo após foi utilizado o comando *w.writerow*, ele é um método da classe *csv.writer*

Para solucionar o problema depois do mapa gerado, foi informado no programa PyCharm que o problema seria um Problema do Carteiro, foi importado o comando *calculate_postman_solution_stats*, foi indicado o circuito utilizado, no qual é o banco de dados com os nós pertencentes a quadra e também o nó no qual se iniciará para resolver o problema e traçar a rota ótima. Por fim foi dado o comando print, no qual permite exibir informações na saída padrão, em que é possível observar o comprimento total obtido pela rota ótima e todos os comprimentos de nó a nó. Na (Figura 17), foi elaborado um diagrama de fluxo que simplifica os procedimentos empregados para a resolução da questão.

Figura 17 – fluxograma



Fonte: Autor

No fluxograma fornecido, todos os passos que foram descritos de maneira minuciosa no texto foram simplificados para facilitar a compreensão. No entanto, é essencial estar familiarizado com os comandos e bibliotecas disponíveis para resolver problemas semelhantes. Além disso, é fundamental saber como utilizar ambientes de desenvolvimento que permitem a criação e implementação de soluções para problemas relacionados ao PCC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O PyCharm foi utilizado para executar o programa e gerar o arquivo com os resultados para a quadra 405 norte, conforme ilustrado na Figura 18. As distâncias fornecidas pelo programa estão expressas em metros. Conforme mencionado anteriormente, o programa fornece as distâncias de nó a nó em metros e, em seguida, realiza o cálculo da distância total percorrida ao realizar o somatório do caminho completo.

Figura 18 – Resultado do menor caminho

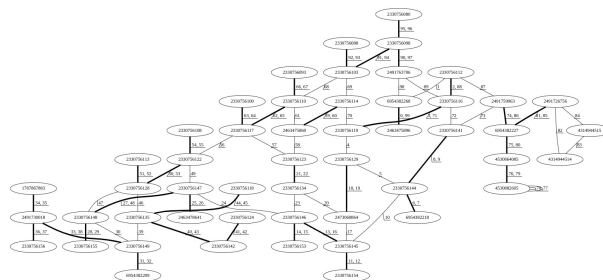
```
(('2330756103', '2330756098', 0, {'distance': 61.906, 'id': 5, 'augmented':
True}))
('2330756098', '2330756080', 0, {'distance': 231.602, 'id': 1, 'augmented':
True}))
('2330756080', '2330756098', 0, {'distance': 231.602, 'id': 1})
('2330756098', '2491763706', 0, {'distance': 5.511, 'id': 4})
('2491763706', '6954382268', 0, {'distance': 59.252, 'id': 59})
('6954382268', '2463475896', 0, {'distance': 3.317, 'id': 54})
distance_walked 12956.750000000004
distance_doublebacked 4532.08
distance_walked_once 8424.670000000004
distance_walked_optional 0
distance_walked_required 12956.750000000004
edges_walked 100
edges_doublebacked 35
edges_walked_once 65
edges_walked_optional 0
edges_walked_required 100

Process finished with exit code 0
```

Fonte: PyCharm (2023)

Após a execução do programa PyCharm, obteve-se o menor caminho para a rota de coleta de RSU, com uma distância percorrida de 12,95675 km. Em uma única vez, a distância percorrida foi de 8,42467 km. Foram percorridos 35 nós duas vezes, enquanto 65 nós foram percorridos apenas uma vez, totalizando 100 nós no total. Na Figura 19, foi realizado o percurso da rota realizada pelo programa, os números nos balões representam os nós, o traçado em negrito representa as arestas percorridas mais de uma vez. Já na figura 20, foi realizado um traçado para representar o roteiro.

Figura 19 – caminho otimizado



Fonte:PyCharm (2023)

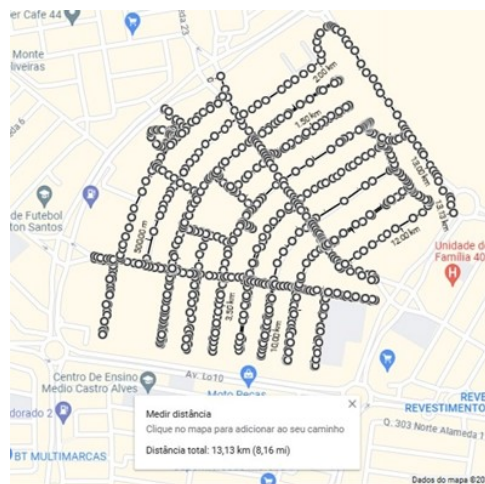
Figura 20 – Indicação de caminho otimizado



Fonte:PyCharm (2023)

É importante ressaltar que a empresa MB Limpeza Urbana não possui um roteiro de coleta de RSU definido e padronizado. Conforme conversa com um motorista, ficou evidente que a rota é decidida mentalmente no momento da coleta, ou seja, pode variar consideravelmente, sendo mais curta ou mais longa dependendo do dia e da escolha do motorista. Dessa forma, para estimar a quilometragem de uma das possíveis rotas que o caminhão pode realizar, devido à falta de informações precisas da empresa, foi feita uma estimativa utilizando o Google Maps. Foi obtida uma quilometragem aproximada com base em um mapa disponibilizado pela empresa. A Figura 21 apresenta essa estimativa realizada.

Figura 21 – Rota estimada pela empresa



Fonte: MB (2023)

Dessa forma, foi feita uma estimativa da distância total no Google Maps, e a rota obtida foi de 13,13 km, conforme demonstrado na Figura 21. A rota tem início na Alameda 8 e é finalizada na saída da quadra, no ponto destacado na imagem. É importante ressaltar que essa rota corresponde a um dia de trabalho em uma rota não padronizada, ou seja, pode variar diariamente

devido à falta de um planejamento definido de rotas.

Assim, a discrepância de quilometragem entre a rota estimada pela empresa e a rota encontrada através do software PyCharm foi de 0,18 km. Na Tabela 7, foram realizados cálculos que representam uma economia de 28,08 km ao longo de um ano. Essa economia resulta em benefícios como economia de tempo, combustível e prolongamento da vida útil do veículo.

Tabela 7 – Economia de quilometragem em um ano

RESULTADO DA DIFERENÇA DE QUILOMETRAGEM		
KM	QTD. COLETA SEMANA	QTD. ANO
0,18	3	52
<i>ECONOMIA (KM/ANO)=</i>		<i>28,08 KM</i>

Fonte: Autor

É importante levar em consideração que, como a trajetória percorrida pela empresa não foi monitorada presencialmente e não dispomos de informações mais precisas sobre a quilometragem, a distância real pode ser substancialmente maior em comparação com a estimativa. Isso pode resultar em uma disparidade ainda maior do que a diferença identificada entre a rota da empresa e a rota ótima encontrada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas informações fornecidas, podemos concluir que a diferença na distância percorrida na quadra em questão não foi muito significativa, sendo aproximadamente 0,18 km a menos utilizando o menor caminho encontrado pelo algoritmo. No entanto, quando pensamos em todas as quadras de uma cidade ou em áreas urbanas densamente povoadas, cada quilômetro a menos percorrido representa uma economia de tempo e dinheiro considerável.

Estabelecer um roteamento otimizado para a coleta de resíduos sólidos urbanos não apenas reduz os custos operacionais, mas também contribui para uma melhor gestão do sistema como um todo. Com um planejamento adequado das rotas, é possível minimizar o tempo de coleta, evitar rotas desnecessárias e garantir uma distribuição mais eficiente dos recursos disponíveis.

Portanto, é importante considerar a aplicação de algoritmos como o algoritmo de Dijkstra e o uso de ferramentas como o PyCharm para aprimorar a gestão da coleta de resíduos sólidos urbanos, visando não apenas a otimização das rotas, mas também a redução de custos, o aumento da eficiência e a minimização do impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acessado em:06 jan 2023.
- ABELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. 2022. Disponível em <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acessado em:06 jan 2023.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 12980: Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos**. 1993.
- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. 2004.
- 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.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>.
- BRASIL, M. d. I. e. d. D. R. **Sistema Nacional de informação sobre saneamento**. Brasília: SNIS: [s.n.], 2021. Disponível em <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis>> (30/05/2023).
- BRASIL, M. d. M. A. **Relatório Municipal De Gestão De Resíduos Sólidos**. Brasília: Ministério do meio ambiente: [s.n.], 2019. Disponível em <<https://sinir.gov.br/relatorios/municipal>> (30/05/2023).
- BRASIL, M. d. S. F. N. d. S. **Manual de saneamento**. Brasília: Funasa: [s.n.], 2019. Disponível em <https://repositorio.funasa.gov.br/bitstream/handle/123456789/506/Manual_de_Saneamento_Funasa_5a_Edicao.pdf> (30/05/2023).
- BRITO, A. P. d. Grafos, a fórmula de euler e os poliedros regulares. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2014.
- CARVALHO, L. E. X. **Desenvolvimento de Solução Integrada de Sistemas de Limpeza Urbana em Ambiente SIG**. Tese — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- CONSTANTINO, A. **Grafos Eulerianos e o Problema do Carteiro Chinês**. 2012. Disponível em <<https://malbarbo.pro.br/arquivos/2012/1747/problema-do-carteiro-chines.pdf>>. Acessado em: 01 mar 2023.
- FUNASA. **Manual de Saneamento**. 2014. Disponível em <<http://xxx.html>> (05/04/2023).
- IBGE. **Censo Demográfico 2010, Área territorial brasileira**. 2010. Disponível em <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acessado em:25 fev 2023.
- IBGE. **Censo 2022**. 2022. Disponível em <<https://censo2022.ibge.gov.br/>>. Acessado em:25 fev 2023.

LIANG, Y.-C.; MINANDA, V.; GUNAWAN, A. Waste collection routing problem: A mini-review of recent heuristic approaches and applications. **Waste Management & Research**, v. 40, n. 5, p. 519–537, 2022. PMID: 33764243. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0734242X211003975>>.

MALAKAHMAD, A.; BAKRI, P. M.; MOKHTAR, M. R. M.; KHALIL, N. Solid waste collection routes optimization via gis techniques in ipoh city, malaysia. **Procedia Engineering**, v. 77, p. 20–27, 2014. ISSN 1877-7058. Fourth International Symposium on Infrastructure Engineering in Developing Countries, IEDC 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814010005>>.

MB. **Informações sobre os veículos, equipes e gestão da empresa MB limpeza pública**. 2023. Entrevista com gestor da MB limpeza pública em 20 de mar de 2023.

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.

PALMAS. **Prefeitura municipal de Palmas: Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos**. 2020. Disponível em <<https://www.palmas.to.gov.br/portal/noticias/saiba-como-solicitar-o-servico-de-recolhimento-de-galhadas-em-palmas/26469/>>. Acessado em: 01 mar 2023.

PALMAS. **Prefeitura municipal de Palmas: Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos**. 2021. Disponível em <<https://www.palmas.to.gov.br/portal/noticias/conheceroitinerario-da-coleta-de-lixodasua-quadraousetorajuda-a-manter-sua-vizinhanca-mais-limpa/27033/>>. Acessado em: 01 mar 2023.

PYCHARM, P. I. **for Professional Developers**. 2023.

RIZVANOĞLU, O.; KAYA, S.; ULUKAVAK, M.; YEŞILNACAR, M. İ. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: a case study from şanlıurfa, turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, Springer, v. 192, p. 1–12, 2020.

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.

SEMARH/TO, S. do Meio Ambiente e R. H. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Tocantins PERS/TO**. 2017.

VU, H. L.; BOLINGBROKE, D.; NG, K. T. W.; FALLAH, B. Assessment of waste characteristics and their impact on gis vehicle collection route optimization using ann waste forecasts. **Waste Management**, Elsevier, v. 88, p. 118–130, 2019.