



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



GABRIEL HENRIQUE CARVALHO REZENDE

**OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DA POLUIÇÃO DE ROTAS DE
VEÍCULOS NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Uberlândia, 2022

GABRIEL HENRIQUE CARVALHO REZENDE

**OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DA POLUIÇÃO DE ROTAS DE
VEÍCULOS NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Defesa de dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil.

Área de Concentração: Engenharia Urbana -
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador^a: Prof^a. Dra. Raquel Naiara
Fernandes Silva

Uberlândia, 2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R467
2022 Rezende, Gabriel Henrique Carvalho, 1996-
OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DA POLUIÇÃO DE ROTAS DE VEÍCULOS
NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS [recurso
eletrônico] : OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DA POLUIÇÃO DE ROTAS
DE VEÍCULOS NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS /
Gabriel Henrique Carvalho Rezende. - 2022.

Orientadora: RAQUEL NAIARA FERNANDES SILVA.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.550>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. SILVA, RAQUEL NAIARA
FERNANDES, 1986-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 287, PPGEC				
Data:	05 de outubro de 2022	Hora de início:	08:30 h	Hora de encerramento:	11:00 h
Matrícula do Discente:	12112ECV013				
Nome do Discente:	Gabriel Henrique Carvalho Rezende				
Título do Trabalho:	Otimização logística da poluição de rotas de veículos no transporte de resíduos sólidos urbanos				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Engenharia Urbana				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Roteirização do processo de coleta de resíduos sólidos urbanos no contexto da logística urbana				

Reuniu-se, em sessão pública na sala de reuniões da FECIV, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Camilla Miguel Carrara Lazzarini - UFU, Marcos Vinicius Sanches Abreu - UFV e Raquel Naiara Fernandes Silva orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Raquel Naiara Fernandes Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Raquel Naiara Fernandes Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/10/2022, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Camilla Miguel Carrara Lazzarini, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/10/2022, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Vinicius Sanches Abreu, Usuário Externo**, em 05/10/2022, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3927777** e o código CRC **C8BD49BC**.

Dedico este trabalho primeiramente a DEUS.

Meus pais.

Meus amigos.

Meus professores.

Os quais foram responsáveis pelo meu crescimento pessoal e profissional até esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte desta caminhada e deste processo que tanto me amadureceu. De forma específica sou imensamente grato a DEUS pela abertura de todas as portas com incríveis oportunidades durante este período. Não menos importante, agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio, pelo carinho e pela compreensão a todos os momentos deste processo. Pois, se hoje sou uma pessoa que leva e conseqüentemente traz mudanças para o mundo ao meu redor, estes atores, foram os responsáveis por me fazer assim!

RESUMO

Este trabalho considera um problema conjunto de roteirização logística de poluição de veículos, caracterizando assim um problema de roteirização de poluição (PRP) onde os custos diretos de combustível e as consequentes emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) dependem da distância percorrida, da declividade viária, e por fim, da velocidade de um veículo de carga associado ao tipo, manutenção e estado geral de um modal rodoviário. Visto a atender essas considerações, esta pesquisa possui como *corpus* central de estudo a roteirização da coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) no distrito de Miraporanga, pertencente ao município de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Desta forma, por meio da utilização de softwares livres em ambiente SIG, esta pesquisa considerou otimizar as rotas do itinerário de coleta com o objetivo de minimizar as emissões e os lançamentos de GEE na atmosfera. Por se tratar de um problema complexo com verificações multifatoriais no estudo logístico, um Processo Hierárquico Analítico (AHP) foi construído com a funcionalidade de elencar a ordem de importância das variáveis do projeto. Referente à complexidade de resolução de otimização de rotas, algoritmos inseridos no software QGIS foram utilizados visando determinar o caminho de menor distância. Os resultados mostraram que houve uma redução de 8,31 % nas emissões de GEE por coleta. Quanto a otimização do PRP, constatou redução de 16,44 % no consumo de combustível em função da distância, velocidade, carga útil e inclinações do trajeto.

Palavras-chave: Problema de roteirização de poluição; Roteirização Logística; Resíduos sólidos urbanos; Sistemas de Informações Geográficas; Softwares Livres

ABSTRACT

This work considers a complex logistics routing issue about vehicle pollution, which is connected to the Pollution Routing Problem (PRP). In the PRP, the direct fuel costs and the resulting Greenhouse Gas (GHG) emissions depend on the distance traveled, on the road slopes, and finally, on the speed of a heavy-duty vehicle. In order to solve this problem, a study of the routing for the urban solid waste (USW) collection was carried out in the Miraporanga district, managed by the municipality of Uberlândia, Brazil. Thus, by using free software in a GIS environment, this paper considers to optimize the waste collection routes in order to minimize GHG emissions into the atmosphere. Because it is a complex problem with multifactorial checks in the logistics study, a Process Hierarchy Analysis (AHP) was developed with the functionality to rank the project variables. During the development of the research, a mathematical equation was formulated to estimate the implementation cost (IC) for a USW collection service according to its logistical variables. Related to route optimization, algorithms inserted into QGIS software were used so as to determine the shortest distance path. The results indicated that there was a reduction of 8.31% in GHG emissions per collection. As for the optimization of the PRP, a reduction of 16.44% in fuel consumption was verified, in terms of distance, speed, payload and road slopes.

Keywords: Pollution routing problem; Logistic routing; Urban solid waste; Geographic information system; Free softwares.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo da logístico dos RSU	19
Figura 2 – Divisão das variáveis multifatoriais do projeto.	24
Figura 3 – Ciclo de caracterização para o problema de otimização de rotas.	32
Figura 4 – Relação dos softwares livres no processo de otimização de rotas.....	33
Figura 5 – Mapa de grafos do distrito de Miraporanga-MG.....	38
Figura 6 – Mapa de grafos referente à incidência de arcos para a classificação de grau dos nós de uma rede. ...	39
Figura 7 - Enquadramento da natureza e especificidade do problema.....	45
Figura 8 – Processo com técnicas de solução para problemas de roteirização a depender da natureza da demanda.	46
Figura 9 – Processo das técnicas de decomposição para escolha das soluções heurísticas.	62
Figura 10 – Exemplo do processo de construção da matriz AHP.....	70
Figura 11 - Localização da área de estudo.	73
Figura 12 – Representação gráfica de trajetos entre o ponto inicial/final e o ponto de coleta.....	74
Figura 13 – Diagrama da metodologia.	77
Figura 14 - Custos do arcos da rede de Miraporanga.....	80
Figura 15 - Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto avaliadas pelos stakeholders.....	87
Figura 16 - Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto avaliadas por um especialista.....	87
Figura 17 - Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto pelo atual estado da arte.....	88
Figura 18 -Árvore de decisão AHP.....	89
Figura 19 – Mapeamento e detalhamento do itinerário da coleta de lixo em Miraporanga-MG.	90
Figura 20 – Representação do perfil longitudinal do itinerário atual.	91
Figura 21 – Mapeamento e detalhamento do novo itinerário da coleta de lixo em Miraporanga-MG.....	93
Figura 22 – Representação do perfil longitudinal do itinerário modelado.	94

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Representação periódica comparativa do consumo de combustível para execução do serviço..... 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de produção de RSU em função da quantidade de habitantes.....	23
Tabela 2 – Consumo estimado anual para deslocamento de veículos a diesel.	28
Tabela 3 – Estimativa de emissões por tipo de gás para deslocamento de veículos a diesel.	28
Tabela 4 – Relação e definição de ferramentas livres utilizadas na pesquisa.	33
Tabela 5 – Relação e avaliação dos plugins de roteirização direta no QGIS.....	36
Tabela 6 – Intervenções para o controle e redução do consumo de combustível.....	65
Tabela 7 – Escala de avaliação usada em comparações de pares.	70
Tabela 8 – Índices de consistência aleatória e de corte.	71
Tabela 9 – Limite de velocidades pertencente à manipulação da rota.....	82
Tabela 10 – Parâmetros variáveis CMEM.....	84
Tabela 11 - Detachamento sobre a rota atual	90
Tabela 12 - Resultados estimados de emissão de GEE.....	92
Tabela 13 - Detalhamento da rota proposta.	93
Tabela 14 - Resultados estimados de emissão de GEE.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{dj} - Nós adjacentes de uma rede de grafos
- A_{ij} - Escala de grandeza às comparações de elementos
- c_{ij} - Custo de deslocamento para roteirização de arcos com capacidade
- d_{ij} - Demanda de uma rede de grafos
- $Fe_{(i)}$ - Fator de Emissão de um gás
- $G_{\{V,A\}}$ - Representação de um grafo
- q_e - Unidades de carga do veículo
- $A_{\{1,2,\dots,n\}}$ - Conjunto de arcos de uma rede de grafos
- $V_{\{1,2,\dots,n\}}$ - Conjunto de nós de uma rede de grafos
- $X_{m,n}$ - Grafo Bipartido de vértices em X
- $Y_{m,n}$ - Grafo Bipartido de vértices em Y

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	- Análise Espacial
AHP	- Análise de Hierarquização de Processos
API	- Application Programming Interface
CMEM	- <i>Comprehensive Modal Emissions Model</i>
CPP-LC	- <i>Chinese Postman Problem with load-dependent Costs</i>
GEE	- Gases de Efeito Estufa
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
MJ	- <i>Mega Joule</i>
OSM	- <i>Open Street Maps</i>
PCC	- Problema do Carteiro Chinês
PCR	- Problema do Carteiro Rural
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante
PO	- Problema de Otimização
POC	- Problema de Otimização Combinatória
PRAP	- Problema de Roteamento de Arcos Particulares
PRP	- Problema de Roteirização de Veículos
PRV	- Problema de Roteirização de Veículos
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SI	- Sistemas de Informação
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SIG-T	- Sistema de Informação Geográfica Aplicada a Transporte
SRPV	- Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos
ST	- Sistema de Transporte
TJ	- Tera Joule

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	17
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 LOGÍSTICA DE CARGAS E LOGÍSTICA REVERSA	18
2.1.1 <i>Problemas existentes a execução do serviço logístico</i>	20
2.1.2 <i>Resíduos sólidos urbanos</i>	22
2.1.3 <i>Sistemas de coleta e transporte à disposição dos RSU</i>	23
2.1.4 <i>Sustentabilidade e logística</i>	25
2.2 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS (PRV)	29
2.2.1 <i>Problema de Roteirização de Poluição (PRP)</i>	29
2.3 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AOS STs.....	31
2.3.1 <i>Softwares livres para o desenvolvimento de modelagem logística</i>	32
2.3.2 <i>Abordagens baseadas em SIG para o problema de roteirização</i>	35
2.4 TEORIA DOS GRAFOS.....	37
2.4.1 <i>Grafos</i>	37
2.4.1.1 <i>Tipos de Grafos</i>	39
2.4.1.2 <i>Grafos eulerianos</i>	41
2.4.1.3 <i>Grafos Hamiltonianos</i>	42
2.5 PROCESSO DE ALOCAÇÃO POR CAMINHO MÍNIMO	42
2.5.1 <i>Caminho mínimo entre todos os pares de vértice de uma rede</i>	43
2.6 PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA ALOCAÇÃO DO CAMINHO MÍNIMO	44
2.6.1 <i>Algoritmo de Floyd-warshall</i>	47
2.6.2 <i>Algoritmo de Dijkstra</i>	48
2.6.3 <i>Algoritmo de Fleury</i>	49
2.6.4 <i>Algoritmo de Hierholzer</i>	49
2.6.5 <i>Algoritmos Genéticos</i>	50
2.7 TAXONOMIA DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA	51
2.8 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO EM NÓS.....	53
2.8.1 <i>Problema do Caixeiro Viajante (PCV)</i>	53
2.9 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO EM ARCOS	54
2.9.1 <i>Problema do carteiro rural</i>	54
2.9.2 <i>Problema do carteiro chinês</i>	56

2.9.2.1	Problema do carteiro chinês com custos dependentes de carga	57
2.9.3	Problema de roteirização em arcos com limite de capacidade	60
2.10	SOLUÇÕES HEURÍSTICAS APLICADAS À ROTEIRIZAÇÃO	60
2.10.1	Estratégias de decomposição de soluções heurísticas aplicadas a roteirização	61
2.11	MATRIZ DE TRANSPORTES	63
2.11.1	Transporte Rodoviário e o consumo de combustível	63
2.11.2	Desempenho Energético	64
2.12	PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (AHP)	66
2.12.1	Processo de execução AHP	66
2.12.2	Verificação de consistência da matriz AHP	71
3	ÁREA DE ESTUDO	72
3.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA	72
4	METODOLOGIA.....	75
4.1	AHP	75
4.2	ESTUDO DE CASO	76
4.2.1	Etapa Informativa: Caracterização da OS	77
4.2.2	Etapa Descritiva: Caracterização das variáveis de estudo por meio de AE	79
4.2.3	Etapa determinística: funções lógicas e matemáticas para resolução do problema	80
4.2.3.1	Determinação do caminho mais curto e características da rota encontrada	81
4.2.4	Estimativa de RSU produzido para modelagem de carga útil do veículo	82
4.2.5	Estimativa de GEE e formulação do PRP	83
4.3	ESTIMATIVA DO CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO	85
4.4	ANÁLISE FINAL.....	86
5	RESULTADOS.....	86
5.1	AHP	86
5.1.1	Árvore de Decisão.....	88
5.2	DESCRIÇÃO DO SERVIÇO DE COLETA ATUAL.....	89
5.2.1	Velocidade Média.....	91
5.2.2	Emissões de GEE.....	91
5.3	MODELAGEM DA ROTA OTIMIZADA	92
5.3.1	Velocidade ideal para o projeto.....	94
5.3.2	Emissões de GEE.....	94
5.4	CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO DO SERVIÇO DE COLETA DE RSU	95
6	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos municípios brasileiros, possuem desafios logísticos e operacionais a serem solucionados (MELQUIADES, 2015). Entre estes, pode-se destacar a otimização de rotas do serviço de coleta dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Assim, o processo de roteirização necessita estar atrelado à produção de movimentações viárias por meio dos Sistemas de Transporte (STs), que podem ser definidos como um conjunto multifatorial de elementos desenvolvidos a partir de variáveis que lidam com as configurações de infraestrutura, de deslocamento urbano e de procedimentos de redes operacionais.

No Brasil, os RSU são coletados de forma domiciliar, por meio de uma gestão operacional muitas vezes defasada que está configurada em um cenário de carências de incentivos fiscais e governamentais (MELQUIADES, 2015). Neste sentido, estima-se que os serviços para a limpeza e disposição dos RSU absorvem aproximadamente entre 7% e 15% dos recursos de todo o orçamento municipal (DETOFENO, STEINER, 2010). Sabe-se que aproximadamente 77 - 95% do orçamento destinado à disposição dos resíduos sólidos é gasto no estágio operacional do serviço, que engloba o desenvolvimento das etapas de coleta e de transporte dos RSU das cidades até a sua destinação no aterro sanitário (DGRS-DMAE, 2021). Destes números, em média 50% do valor são utilizados exclusivamente para a coleta e transporte dos RSU (DETOFENO, STEINER, 2010), impactando negativamente o ambiente urbano devido ao uso excessivo de energia e considerável emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) lançadas à atmosfera.

De acordo com a International Energy Agency (IEA), o transporte global é responsável por 24 % das emissões diretas de gases poluentes oriundos da queima de combustível, atingindo um valor de 37% do lançamento de CO₂ à atmosfera (IEA, 2020). Com a representatividade destes números, surge então a necessidade da aplicação do Problema de Roteirização da Poluição (PRP) para o desenvolvimento e o planejamento de transportes atrelados aos serviços urbanos (LAI et al, 2021; MAKASHA, MGALE E KINYASH, 2022). De maneira análoga observou-se o processo operacional do serviço aplicado ao planejamento e à roteirização do itinerário de coleta dos RSU no distrito de Miraporanga (MG). Visando o desenvolvimento desta pesquisa, a variável relacionada ao custo de implementação (CI) para a roteirização dos veículos de coleta foi considerada em primeiro plano. Uma vez que, a partir do desenvolvimento desta, outras variáveis secundárias

também podem ser otimizadas. Por exemplo, a partir da redução do CI, pode-se reduzir em uma escala diretamente proporcional o consumo de combustível e a quantidade de GEE emitidas e lançadas a atmosfera para a realização do serviço (LAI et al, 2021).

O problema de roteirização de poluição (PRP) é uma formulação eficiente e abrangente para abordagens que almejam minimizar as emissões de carbono oriundos da queima de combustível de veículos. Sabe-se que as emissões de GEE resultantes do consumo e da queima de combustível dos veículos são consequência de alguns fatores de roteirização que vão além da distância percorrida (ERICSSON, 2001; MOGHANI et al., 2020). Desta maneira, quanto ao desenvolvimento da pesquisa, foram aplicados modelos de formulações matemáticas que dispõem de recursos efetivos a partir da manipulação de algoritmos em processos iterativos que lidam com o desenvolvimento e a configuração do percurso em uma rede de grafos. Neste sentido, a interação nesta pesquisa foi manipulada a partir dos custos de direção (velocidade), da análise de declividade, da estimativa de carga útil e por fim, da distância do percurso.

Finalmente, enquadrado a um problema complexo de causa multifatorial (XU et al, 2015), foi desenvolvido e estruturado ao longo deste artigo a matriz para a determinação de um Processo Hierárquico Analítico (AHP) com o objetivo de compreender o módulo de cada variável expressa no parágrafo anterior. Três cenários distintos foram projetados visando uma maior congruência desta estimativa. São eles: os stakeholders representados pela empresa executora de serviço e pelo órgão municipal responsável da cidade de estudo; um especialista em transporte e por fim, o atual estado da arte para a solução e a otimização deste problema.

A hipótese para esta pesquisa, baseou-se na afirmação de que o comportamento e a distribuição espacial de todas as variáveis avaliadas e mencionadas neste trabalho, produzam a partir do PRP, resultados sustentáveis à execução de serviços urbanos à disposição da sociedade. Assim, uma equação matemática que estima o valor de CI foi desenvolvida pelos autores a fim de facilitar a tomada de decisão para o planejamento de novos serviços logísticos de cargas, principalmente atrelados ao transporte de RSU.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros de minimização de emissões de GEE no traçado de rotas efetivas para o deslocamento de veículos do sistema de coleta de RSU.

1.1.2 Objetivos específicos

- Modelar dados operacionais e georreferenciados do sistema de coleta dos RSU a partir de variáveis que caracterizam as dimensões geométricas viárias (declividade, distância) e os custos de direção do veículo (uso do veículo, velocidade, tempo de serviço, periodicidade da coleta);
- Levantar informações de acordo com o atual estado da arte para a resolução de problemas oriundos de redes de transporte vinculados a serviços logístico;
- Propor rotas que minimizem os custos de consumo de combustível a partir de uma rota inteligente que visa reduzir os impactos ambientais gerados pela emissão de GEE produzidas pelos veículos de coleta;
- Estabelecer relação dos resultados a partir dos cenários de execução do serviço atual em função da proposta algorítmica do uso de geotecnologias para a nova modelagem de execução do serviço de coleta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O transporte rodoviário de cargas é vital para o funcionamento da economia e da cadeia de abastecimento e descarte. No entanto, impactos negativos do uso excessivo de energia e de emissões consideráveis de gases de efeito estufa oriundos desta atividade, tem incidido significativamente sobre a qualidade de vida das pessoas e do meio ambiente necessitando assim, serem considerados (LAI et al, 2021).

Desta forma, este capítulo parte da funcionalidade de informatizar o leitor sobre a complexidade do problema de roteirização de veículos sobre aspectos de poluição. Devido à variabilidade de elementos participantes ao problema de otimização de rotas e combustível, a seção discorre de todas as classes para o estudo, análise e avaliação de uma rede de transportes. Iniciando à apresentação de conceitos logísticos atrelados aos sistemas de transportes (ST) e se aprofundando às definições de uma rede viária a partir da teoria de grafos aplicadas à trajetória de caminho mínimo contendo as mais variáveis restrições. Todos estes conteúdos, para esta seção, foram descritos com a possibilidade de resolução a partir da utilização de geotecnologias.

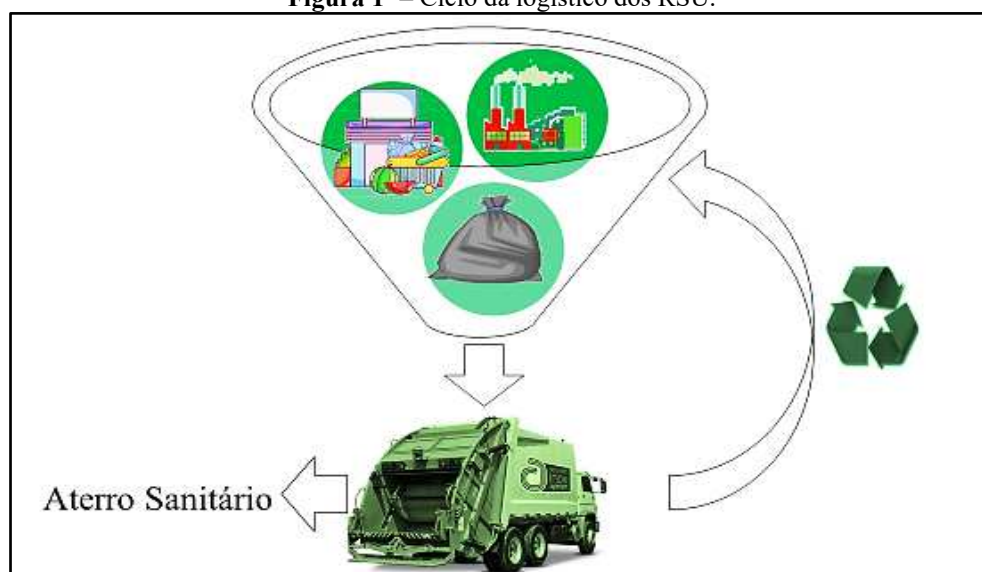
Por fim, propício à tomada de decisão dos inúmeros elementos citados anteriormente, uma breve revisão de literatura sobre a Análise de Hierarquização de Processos (AHP) foi estruturada, de maneira a auxiliar com maior precisão a condutibilidade de todo o processo deste projeto.

2.1 LOGÍSTICA DE CARGAS E LOGÍSTICA REVERSA

Estima-se que dentro da cadeia logística, o transporte de cargas, seja qual for sua escala, representa dois terços dos custos de todo o desenvolvimento de tráfego (BRANCO E GIGIOLI, 2014). Deste modo, a falta de técnicas de planejamento e de gerenciamento logístico produz o encarecimento dos serviços de transporte, que conseqüentemente, causam prejuízos às classes ambientais, sociais e econômicas da população (NITHYA E VELUMANI, 2012).

Assim, referente à execução e à oferta dos serviços de transporte de cargas, Ali et. Al (2018) descreve que o processo que executa a coleta da disposição dos RSU que retornam à cadeia de abastecimento, torna-se conhecido como logística reversa. Esta, por definição, é abrangente a todo o planejamento logístico de fluxo e operação relacionado ao retorno de bens, embalagens, e materiais produzidos e descartados, quer sejam eles reciclados ou não (Figura 1). Sendo este último, destinados majoritariamente ao aterro sanitário, ou à cadeia de novos insumos de produtos da cadeia de suprimentos (PRAJAPATI et al, 2019).

Figura 1 – Ciclo da logística dos RSU.



Fonte: Autor (2022)

Segundo a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o papel da logística reversa é projetado para a execução de serviços que atuem como um instrumento de desenvolvimento ambiental, social e econômico. Assim, as classes deste desenvolvimento exercem atividades que viabilizam a coleta e/ou restituição do retorno de materiais da cadeia de suprimentos já utilizados e descartados. De forma sucinta, o processo é construído a fim de garantir que os resíduos cheguem com eficiência ao seu destino (BRASIL, 2010).

Quanto a conceitos e definições gerais da logística de cargas, sabe-se que esta abrange uma classe majoritária que propõe projetar atividades que facilitem a movimentação do produto. Consequentemente, toda movimentação construída passa a ser projetada a partir de uma coordenação da oferta e de uma demanda no cumprimento de custos e objetivos do serviço, seja qual for seu destino (Figura 1).

Assim, ao analisar o comportamento deste transporte de retorno de bens, seja qual for sua escala, constata-se que sua operacionalização visa construir parâmetros que incentivam a sustentabilidade logística, com resultados que alcem a rentabilidade econômica para o planejamento, a operação, e o controle do recolhimento destes produtos, a partir do desenvolvimento científico e tecnológico de

uma otimização matemática que produza resultados otimizados por meio de uma análise de dados multivariados (MELQUIADES, 2015).

Neste contexto e atrelado à execução do serviço de coleta, os trajetos e itinerários percorridos pelos veículos coletores possuem como objetivo alcançar as maiores capacidades operacionais, de modo a transportar o maior número de resíduos, por meio do menor desgaste mecânico. Assim, a coleta de RSU torna-se uma importante atividade logística, inserida ao Sistemas de Transporte (ST), que pode ser delimitada de forma sistêmica e multifatorial (LOWRY E LOWRY, 2014). Portanto, há a necessidade de otimizar este processo, de forma a implementar métodos tecnológicos que resultem na diminuição do tempo, no planejamento da frota e no retorno do dinheiro investido. O resultado final e esperado almeja proporcionar qualidade e pontualidade do atendimento e do serviço prestado por meio dos STs.

2.1.1 Problemas existentes a execução do serviço logístico

Associado ao conceito de aplicação da logística, seja de cargas ou reversa, e inseridas ao processo de urbanização das cidades, percebe-se em sua maioria, que as cidades brasileiras enfrentam dificuldades práticas para a implantação de ações sustentáveis, principalmente no que diz respeito à análise e projeção da quantidade de resíduos sólidos gerados no ambiente urbano. E, conseqüentemente, à sua má gestão de planejamento e execução de serviço. Neste contexto, e inseridos à revisão bibliográfica do assunto, três principais problemas precisam ser estudados. A dimensão destes englobam questões de causas econômicas, ambientais e operacionais.

Quanto à concepção de problemas econômicos enquadrados neste processo, constata-se que nos últimos anos, houve um grande crescimento na demanda por materiais de consumo duráveis (ISWA, 2016). Isto conseqüentemente, produziu um desenvolvimento acelerado de produção, que gerou efeitos quantitativos à demanda fabricada, resultando assim, na diminuição da vida útil dos produtos (KAZA et al, 2018). Assim, a cada ano, a cadeia produtiva de insumos e produtos exerce um papel fundamental por meio do fornecimento de bens de consumo de um indivíduo. Desta maneira, o competitivo mercado produz de forma sistemática, uma maior quantidade de materiais com o objetivo de suprir a demanda populacional. Logo, este índice de consumo exacerbado desenvolve problemas oriundos da disposição e descarte destes materiais (FRANÇA E ARANTES, 2019).

Deste modo, e inseridos ao viés econômico do problema de superávit do balanço das classes de produção/descarte, o processo reverso da cadeia de suprimentos determina que a expedição para conduzir a preservação e ou manutenção do valor produzido e descartado é bastante crítica. Em suma, a complexidade da logística reversa está associada às dimensões econômicas que necessitam de um planejamento que objetiva compreender o rápido aumento de matéria produzida concomitantemente ao retorno de todo este volume. Assim, associado às restrições de transporte, este problema torna-se ainda mais complexo, uma vez que, faz-se necessário o investimento para a conscientização e a educação populacional juntamente com as técnicas computacionais para o aprimoramento operacional do serviço (SATHISH E JAYAPRAKASH, 2017).

Quanto às demandas de classes ambientais, a crescente necessidade de descarte de resíduos atua como a evidência mais proeminente de questões ecológicas e sustentáveis. Inicialmente, os resíduos municipais eram disponibilizados totalitariamente em lixões e aterros, sanitários ou controlados. Entretanto, devido às circunstâncias e recomendações globais de incentivo a técnicas sustentáveis do ambiente urbanizado, têm crescido o número de incentivos à coleta seletiva (ONU, 2017).

Logo, o processo que transporta o retorno destes materiais e bens de consumo, independentemente do seu destino final, atua em uma relação diretamente proporcional às classes ambientais, uma vez que a otimização destes serviços podem aperfeiçoar o planejamento e o alcance total de todos os pontos nas rotas de coleta, reduzindo assim, o acúmulo de lixo, a distância percorrida, o retrabalho desnecessário, e conseqüentemente, a redução da emissão de GEE lançados à atmosfera pelo deslocamento dos veículos coletores (CETESB, 2021).

Por fim, sobre os problemas de ordem em nível operacional, as deliberações a serem executadas, referem-se às decisões do dia a dia. Segundo Ballou (2006), desenvolver e planejar soluções otimizadas para os problemas de roteirização e programação de veículos se tornaram ao decorrer do tempo atividades cada vez mais complexas. Principalmente em função do número de variáveis restritivas a serem tratadas. Conduzibilidade do motorista, janela de tempo, barreira de tráfego (acidentalidade viária, relação semaforica, desvios, intercessões), peso específico das cargas nos veículos coletores, capacidade de peso e cubagem, velocidade média calculada e por fim, a

geometria tridimensional da forma urbana, são algumas variáveis que acarretam alterações sobre o resultado final de fluxo (GHOSE et al, 2006).

Neste contexto, são mensurados e delimitados os pontos iniciais e finais das bases dos veículos. O intuito é certificar que o trajeto definido tenha uma menor taxa de caminhos improdutivos sem exceder a capacidade de carga do veículo. Assim, de forma a atender estas variáveis, os a ferramentas de roteirização coletam dados a partir de técnicas que abrangem a utilização de geotecnologias, e os executam baseados na utilização de algoritmos avançados de otimização, com a função de estabelecer modelos robustos que minimizam a janela de tempo e o custo total da operação (VIEIRA, 2008; REINA, 2012).

2.1.2 Resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos de origem urbana (RSU) são aqueles produzidos pelas inúmeras atividades humanas que são desenvolvidas no município, abrangendo resíduos de várias origens como: residenciais, comerciais, de estabelecimentos de saúde, industriais, da limpeza e varrição pública, construção civil, entre outros (SINGH et al, 2014). Entre os vários RSU gerados, os resíduos de origem domiciliar, comercial e de limpeza pública são frequentemente destinados para a disposição em aterros, que são de responsabilidade do poder municipal (BRASIL, 2010).

Delimitada à responsabilidade do poder público em administrar o setor de coleta, constata-se que o gerenciamento dos RSU pode ser compreendido como uma atividade multidisciplinar que inclui diferentes etapas, a saber: a geração, a separação, o armazenamento, a coleta, o transporte, o processamento, a recuperação e por fim, o descarte desses materiais (RADA et al., 2013). Deste modo, esta pluralidade de etapas envolve a cooperação de diversos atores que compõem o município, representados pela população e pelas autoridades locais para as atividades pertinentes à execução do serviço (GASKA et al, 2018). Assim, essa ação mútua de cooperação, tem como principal objetivo a proteção da saúde pública e do meio ambiente por meio da conservação dos recursos naturais (SALLEM et al, 2021).

No Brasil, os RSU são dispostos para a coleta de forma pontual e domiciliar, ou seja, a coleta é realizada a partir do deslocamento de diversos e diferentes pontos dispersos geograficamente do

ambiente urbanizado (MELQUIADES, 2015). É dentro desta necessidade, que surgem estratégias que visam balancear a produção, a disposição e o descarte destes produtos. A correlação entre estes três estágios delimita um fator que procura otimizar a demanda, os processos e os custos operacionais por meio de aspectos logísticos inseridos no estudo das formas de configuração das cidades (ZHAO et al, 2020).

A fim de caracterizar quantitativamente as dimensões dos RSU, principalmente tangente à contagem de volumes gerados e descartados, verificou-se que os resultados do ano de 2016 mostraram que o volume descartado atingiu um número de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas. Assim, em termos mais específicos, referente à produção per capita média mundial (quantidade em peso de resíduos (kg), que uma pessoa pode produzir por dia), a média atingida foi de 0,74 kg/habitante/dia (ISWA,2016; KAZA et al, 2018). Entretanto, devido à oscilação da população urbana atrelada ao tamanho das cidades (Tabela 1), considera-se como faixa média de variação no Brasil, localidade da área de estudo desta pesquisa, valores entre 0,5 a 0,8 kg/habitante/dia (ABNT NBR 1004/2004; ABRELPE, 2018).

Tabela 1 – Estimativa de produção de RSU em função da quantidade de habitantes.

Classificação quanto ao tamanho das cidades	População urbana (Habitantes)	Produção per capita (Kg/habitante/dia)
Pequena	≤ 30 mil	0,5
Média	> 30 ≤ 500 mil	De 0,5 a 0,8
Grande	> 500 mil ≤ 5 milhões	De 0,8 a 1,0
Megacidade	> 5 milhões	Acima de 1,0

Fonte: Adaptado ABNT NBR 10.0004 (2022)

2.1.3 Sistemas de coleta e transporte à disposição dos RSU

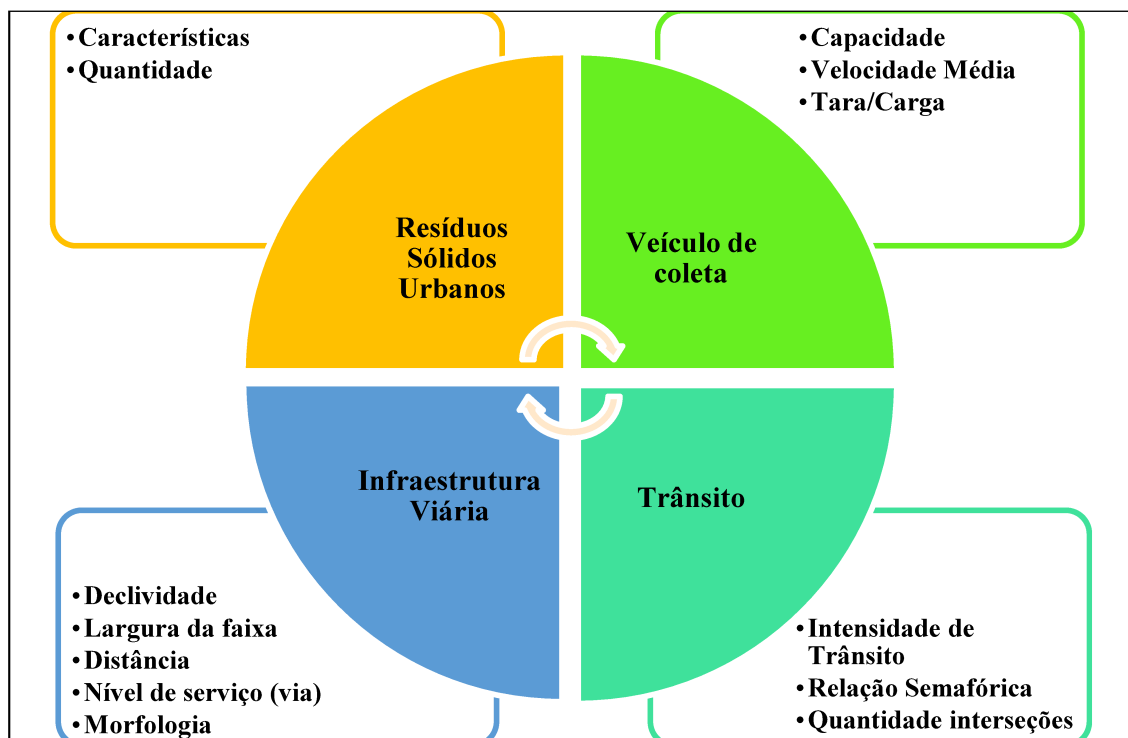
Os STs podem ser compreendidos como um conjunto de técnicas que buscam promover o deslocamento, sejam eles de carga, de bens e serviços ou de pessoas. Este deslocamento, diz respeito à movimentação realizada a fim de atingir diferentes localizações geográficas, a partir das pluralidades de trajetos existentes (SOLÁ et al, 2018). A respeito dos sistemas de coleta e transporte para o recolhimento de RSU, os veículos normalmente utilizados para a execução do serviço, são caminhões adaptados com carrocerias compactadoras que variam de 5 m³ e podem chegar até 24

m³, ou seja, com capacidade de transportar aproximadamente 5-24 toneladas de lixo (DGRS-DMAE, 2021).

A este sistema, estão configuradas diversas características de grandezas tridimensionais do espaço urbano (relevo e dimensões geométricas da infraestrutura viária), associadas às influências de densidade populacional, edificação e ao comportamento de trânsito do ambiente urbanizado. Portanto, tangente à delimitação do itinerário de uma frota estas variáveis associadas às técnicas de procedimentos matemáticos e computacionais, não devem ser trabalhadas isoladamente em uma roteirização (BRASIL, 2010; BACAU et al, 2021).

Estes procedimentos computacionais são formados por Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos (SRPV), inseridos a proposta de modelagem do Problema de Roteirização da Poluição de veículos (PRP), com a funcionalidade de otimizar as rotas a partir de métodos matemáticos que envolvem o tratamento de variáveis multifatoriais das vias, dos RSU, do veículo coletor e do trânsito (SANTOS et al, 2021). Estas variáveis, estão ilustradas na Figura 2, com suas respectivas classes.

Figura 2 – Divisão das variáveis multifatoriais do projeto.



Fonte: Autor (2022)

2.1.4 Sustentabilidade e logística

A sustentabilidade pode ser definida pelo gerenciamento e utilização consciente dos recursos em função da sua taxa de renovação (GUIMARÃES E FEICHAS, 2009). O seu objetivo é promover a equidade social em todas as comunidades e futuras gerações, por meio da eficiência energética de seu uso (MAYER, 2008; HAK et al, 2012). Associado a este conceito, o processo de urbanização enfrenta dificuldades práticas para a implantação de ações sustentáveis, principalmente no que diz respeito à quantidade de resíduos sólidos gerados nas cidades, e conseqüentemente a sua má gestão de planejamento e operacionalização até seu destino final.

Desta maneira, planejar ambientes urbanos economicamente viáveis, socialmente justos e ambientalmente corretos que objetivam a redução de desperdício, danos ambientais e que promovam qualidade no tráfego urbano, é uma das preocupações apresentadas pela Habitat III, Conferência das Nações Unidas sobre Habitação e Desenvolvimento Sustentável para aprovação da Nova Agenda Urbana (NAU) (ONU, 2017). Assim, entre as diversas propostas de documentos que trazem recomendações à oferta de serviços urbanos, pode-se destacar a implementação de técnicas que objetivam a operacionalização e o controle da geração de RSU, de forma a minimizar os impactos nocivos que o lixo causa à saúde humana, à economia, ao transporte de logística reversa e ao meio ambiente (JOHNSTON, 2016; LAI et al, 2021).

Neste sentido, organizações internacionais têm implementado um conjunto de diretrizes que visam orientar o desenvolvimento de estudos, pesquisas, políticas e ações dentro do ambiente urbanizado, seja qual for sua escala (ONU, 2017; IEA, 2020). No caso do Brasil, o antigo Ministério das Cidades, agora representado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, orienta a adoção de práticas para o planejamento, para a construção e para a gestão de distritos urbanos, cidades e metrópoles, que sejam consonantes à promoção de assentamentos humanos e comunidades resilientes, inclusivas, seguras, sustentáveis e inteligentes (ABNT NBR ISO 37101/2017; ABNT NBR ISO 37120/2017).

Assim, associados a oferta e a partir da utilização e da disposição dos STs, o Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV), instituído pela lei 6.938 de 31 de agosto de 1981 e que dispõe da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece normativas e recomendações que assegurem o controle e

os limites de produção de gases poluentes em função da qualidade do ar, principalmente em resposta à emissão de GEE oriundos da queima de combustível de veículos automotores (BRASIL, 2013; CETESB, 2021).

Tendo em vista a gravidade deste assunto, o Boletim de Gases de Efeito Estufa da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) emitiu informações que comprovam o aumento da emissão de GEE ao longo dos anos (ONU, 2018). De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), no que diz respeito à essa emissão, a utilização de veículos automotores é responsável pela produção e lançamento dos seguintes gases à atmosfera: Óxido de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), óxido de enxofre (SOx), material particulado (MP), Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano (NMVOCs), entre outros (CETESB,2021). Visto a estimar estes valores, sabe-se que a sua obtenção está baseada na tabela 1-39 do manual de referência do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (IPCC, 1996), obedecendo à seguinte Equação (1) do método *bottom-up* (que aplica formulas oriundas do fator de emissão de um gás, do tipo de combustível consumido, da distância percorrida e do tipo de veículo):

$$Emiss\tilde{a}o_i = \sum(FE_{iab} \cdot Atividade_{ab}) \quad (1)$$

Onde:

FE = Fator de Emissão (g/ km);

Atividade = Entrada (gasto) de energia (Tera joule/ TJ), ou distância percorrida (Km);

i = emissões de um gás i = NOx, CH4, NMVOC, CO, N2O, CO2;

a = Tipo de combustível;

b = Setor de execução da atividade.

Assim, o Fator de emissão (FE) de CO₂ e demais gases (i) para o deslocamento de veículos pesados abastecidos a diesel é aplicado ao valor de: 770 g/km; ou 3140 g/kwh de combustível ou 74 g/MJ. Onde, a utilização de qualquer uma destas sentenças depende da unidade de medida trabalhada do sistema internacional (SI) adotado à região que está inserida o projeto. A fim de conhecimento, uma

vez que não existem (FE(i)) levantados e padronizados às diretrizes das associações brasileiras para veículos a diesel, foram consideradas para esta pesquisa as recomendações e as estimativas do deslocamento de veículos pesados europeus (IPCC, 1996).

O método *bottom up* também prevê o cálculo de emissão dos gases poluentes a partir da quilometragem anual rodada pelo veículo. Este cálculo é baseado na classe do veículo e no tipo de combustível de rodagem (Equação 2).

$$\text{Emissão (i)} = F \times \text{FE(i)} \times (\text{Km média (a)}) \quad (2)$$

Onde:

FE = Fator de Emissão (g/ km);

F = número de veículos da frota;

i = emissões de um gás i = NO_x, CH₄, NMVOC, CO, N₂O, CO₂;

Km média (a) = Distância média percorrida no ano.

Conforme a variável de emissão de gás expressa por (i) nas equações desta seção, outros gases lançados à atmosfera decorrentes da atividade logística necessitam ser verificados e detalhados. Entre eles, o metano (CH₄), que é um dos principais contribuintes para o efeito estufa. Sendo que 75% de suas emissões são oriundas de atividades humanas industriais, logísticas, agropecuária, etc. Já o formaldeído atmosférico (HCHO) é outro gás intermediário poluidor presente em todas as cadeias NMVOC. Sabe-se que sua principal fonte na atmosfera resulta da oxidação de metano (CH₄), levando eventualmente ao CO₂, que atualmente, é o maior contribuinte para causas de efeito estufa no planeta (IEA, 2020; LAI et al, 2021).

Assim, a fim de detalhar este processo, torna-se possível a realização do cálculo das emissões líquidas de CO₂, onde carbono incluso aos gases classificados não-CO₂ são subtraídos da taxa de carbono total. Para o caso do carbono, sabe-se que as massas molares do carbono e do oxigênio são respectivamente, 12 g/mol e 16 g/mol, possibilitando assim cálculos estequiométricos a partir do consumo de combustível e relação da distância percorrida do veículo de análise (IPCC, 1996).

Quanto aos demais gases, o ideal é utilizar uma correlação dos fatores de emissão formulados e atualizados pela CETESB, juntamente com as estimativas do IPCC. Os resultados estimados de emissões, na maioria dos casos, necessitam ser convertidos da unidade original (g/km) para a unidade usual de metodologia do IPCC (kg/TJ). Os fatores ponderados basearam-se na composição da frota circulante, por ano de licenciamento do veículo. Assim, Lima et al (2014) estima os valores dos fatores de emissão de CO = 0,144 g, CH₄ = 0,06 g, NO_x = 0,973, N₂O = 0,03 e NMVOC = 0,8 (CETESB, 2016).

A Tabela do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2013), juntamente com os dados da CETESB (Relatório PROCONVE de 2006), detalha alguns cálculos de distribuição de combustível anual para o tipo de veículo circulante. Para o caso de caminhões, o consumo estimado de veículos a diesel gira em torno de 0,4718 (Kg/TJ). A Tabela 2 a seguir, detalha o consumo estimado anual para cada um dos principais gases poluentes.

Tabela 2 – Consumo estimado anual para deslocamento de veículos a diesel.

CO	CH₄	NO_x	N₂O	NMVOC
166 Kg/TJ	6,4 Kg/TJ	955 Kg/TJ	0,60 Kg/TJ	76 Kg/TJ

Fonte: Adaptado (BRASIL,2013)

Referente a esta análise, existem dados tabelados disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2013) e pela IPCC (1996) que informam estimativas das emissões por tipo de gás, combustível utilizado e categoria de veículo utilizado para deslocamento. Visto atender as parametrizações deste projeto, sabe-se que para veículos de carga a diesel, os resultados apresentam os seguintes valores de emissões por tipo gás (Tabela 3), lembrando que para o cálculo de CO₂ os valores são subtraídos da taxa de carbono total.

Tabela 3 – Estimativa de emissões por tipo de gás para deslocamento de veículos a diesel.

CO₂	CO	CH₄	NO_x	N₂O	NMVOC
-----------------------	-----------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	--------------

79.217 Gg/ano	176 Gg/ano	6,70 Gg/ano	1.004,7 Gg/ano	0,65 Gg/ano	82,3 Gg/ano
---------------	------------	-------------	----------------	-------------	-------------

Fonte: Adaptado (BRASIL,2013)

Por fim, considerando esta situação de controle socioambiental, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, estabelece que a responsabilidade da disposição e custos de transporte dos RSU, devem ser gerenciadas de forma compartilhada. Este compartilhamento é realizado por meio da fragmentação em seis diferentes níveis de divisão, a incluir o setor nacional, o estadual, o microrregional, o intermunicipal, o metropolitano e por fim, o municipal e o distrital (BRASIL, 2010).

2.2 PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS (PRV)

O PRV consiste em projetar e modelar rotas de deslocamento a partir de um ponto inicial e objetiva atender um conjunto de localidades dispersas com determinadas e diferentes demandas. A restrição deste problema é baseada na premissa de que cada deslocamento para um endereço pontual é restringido pela capacidade do veículo, pela distância total e pelo tempo de viagem. Estas variáveis, determinam o planejamento de dimensionamento e trajetória de uma frota de veículos. Assim, a natureza deste problema é enquadrada a uma classe de otimização combinatória e programação inteira, que almeja minimizar os custos totais de uma rota.

2.2.1 Problema de Roteirização de Poluição (PRP)

Especificamente, o PRP possui o objetivo de construir rotas que minimizam uma função objetivo de forma a integrar o custo de roteamento do veículo (consumo de combustível, aspectos poluitivos, etc.) e os custos de direção (utilização do veículo, salário dos motoristas a depender do tempo de execução do serviço e outros aspectos de custos diretos). Assim, torna-se necessário a compreensão e a aplicação da modelagem dos custos de direção e dos custos fixos de veículos, que é comumente utilizado em problemas de roteirização de veículos heterogêneos (KOÇ et al, 2016).

O PRP é uma formulação eficiente e abrangente para abordagens que almejam minimizar as emissões de carbono oriundos da queima de combustível de veículos. Sabe-se que, as emissões de GEE resultantes do consumo e da queima de combustível dos veículos são consequência de alguns

fatores de roteirização que vão além da distância percorrida (ERICSSON, 2001; MOGHANI et al., 2020).

Segundo Demir e Cols. (2014b), o consumo e a queima de combustível do veículo é dependente da velocidade, inclinações de greide viária (declividade), trânsito típico, método de condutibilidade do motorista, dimensionamento da frota e a carga útil (tara) do veículo de transporte.

As inclinações de greide, conhecidas também como declividades viárias, apresentam uma significativa influência na economia de combustível de veículos motorizados, isto porque reduz significativamente os esforços mecânicos produzidos para o deslocamento (SUZUKI, 2011). De forma a se exemplificar, para o deslocamento de um veículo leve típico sobre uma superfície viária com inclinação superior ou igual a 6%, o consumo de combustível pode aumentar, em média, de 15 a 20% (BORIBOONSOMSIN E BARTH, 2009). Em contrapartida, para deslocamento de veículos de carga, um aumento ou redução de declividade viária (1-4%) pode reduzir ou aumentar o consumo de combustível em mais de 50% (DAVIS et al, 2009).

Quanto aos estudos da comunidade acadêmica sobre este tema, constata-se que existem poucos trabalhos, fora do contexto de aplicação dos PRPs, que analisam o efeito de declividade viária no consumo de combustível. Por exemplo, Tavares et al. (2009) utiliza um modelo de regressão exponencial (método COPERT-III, introduzido por Ntziachristos et al. (2000) para modelar a estimativa do consumo mínimo de combustível durante o processo de coleta de resíduos sólidos. Os autores estudaram dois problemas de roteirização do mundo real, e concluíram que a rota ótima não corresponde necessariamente àquela com a distância percorrida mais curta. Seus resultados de modelagem computacionais demonstraram que são possíveis economias significativas no consumo de combustível para rotas mais longas com inclinações de greide controladas.

De forma a complementar a abordagem do parágrafo anterior, a contribuição de Suzuki (2011) propôs um modelo de regressão linear para calcular a taxa de consumo de combustível de um caminhão pesado, fundamentado no estudo de eficiência de combustível de Davis et al. (2009). O autor incluiu o fator de declividade viária como um dos componentes da função objetivo (distância e consumo de combustível), destinada a formular um problema do caixeiro viajante com restrições de tempo.

Em relação à variável de velocidade do veículo, Bektas e Laporte (2011) abordaram pela primeira vez a velocidade inserida na área dos PRPs. Na formulação original deste problema, eles assumiram explicitamente que a velocidade em cada arco é escolhida a partir de uma lista predefinida de valores possíveis, ou seja, a predeterminação de uma velocidade ótima para redução de custos.

Em relação às implementações das demais variáveis, como trânsito típico, condutibilidade veicular, carga útil e dimensionamento da frota, uma enorme variedade de métodos de solução tem sido proposta para resolver os PRPs (XIAO et al, 2020). Assim, as metaheurísticas são recursos que podem ser construídos a partir da manipulação de algoritmos de aproximação em processos iterativos que lidam com o desenvolvimento e a configuração do percurso em uma rede de grafos. O emprego delas, visam encontrar soluções tão ótimas quanto possível para enquadramento de problemas difíceis (DEMIR et al., 2012, 2014a). De forma conclusiva, a metaheurística são métodos de solução que possui como objetivo a construção de um resultado satisfatório para um problema, entretanto sem garantias exatas de otimização (LUZIA E RODRIGUES, 2009).

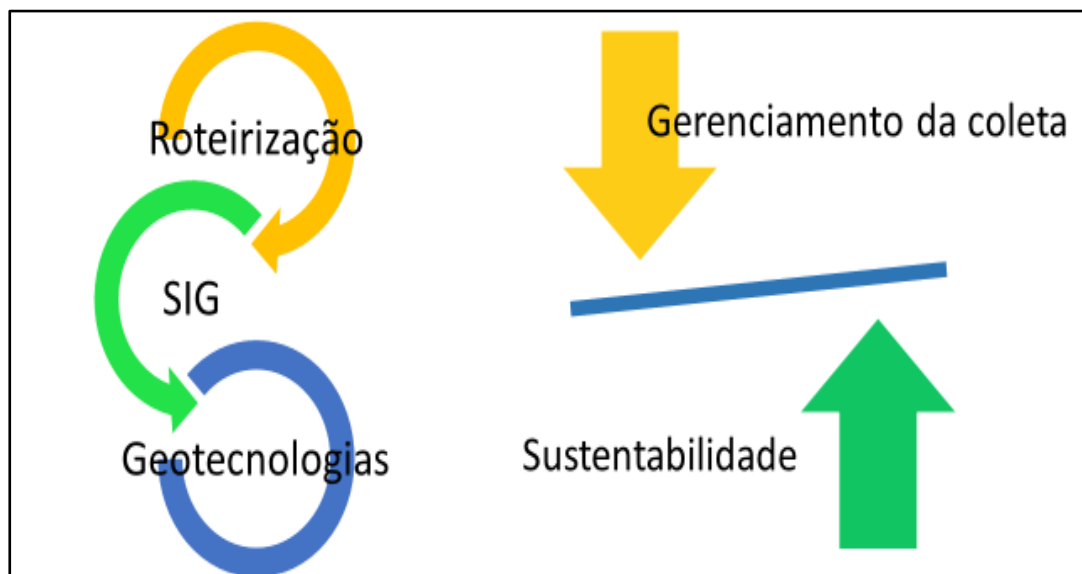
Outras abordagens são as aplicações de algoritmos evolutivos e genéticos que vão determinar os pares de interação para a busca de resultados efetivos (KOÇ et al., 2014; RAUNIVAR et al., 2019). Por fim, também existe no cenário científico a utilização de abordagens híbridas, que lida com a correlação de processos exatos e aproximados ao problema (TIRKOLAEI et al., 2014; RAUNIVAR et al., 2019).

2.3 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AOS ST_s

As geotecnologias estão configuradas ao conjunto de técnicas e ferramentas que englobam o desenvolvimento associativo entre *hardwares* e *softwares*. Esta associação, possui como métrica, alcançar informações georreferenciadas a partir da aquisição, da modelagem e do processamento de informações geográficas. Por fim, o tratamento destas informações pode ser executado através do conjunto de técnicas de processamento informatizado dos dados georreferenciados, ou seja, por meio de geoprocessamento (EDWARDS E GRIFFINS, 2013).

Assim, inseridas às aplicações geotecnológicas, existem uma vasta e diversificada quantidade de ferramentas e *softwares* que utilizam técnicas de análise especial (AE) e geoprocessamento aos estudos de roteirização de veículos, principalmente associados à cadeia logística por meio do uso dos sistemas de informação (SI) (BRITO, 2006). Os dados coletados considerados proeminentes ao estudo viário para a otimização de rotas sustentáveis, são então georreferenciados, executados e tratados em ambientes conhecidos como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), conforme ilustração da Figura 3.

Figura 3 – Ciclo de caracterização para o problema de otimização de rotas.



Fonte: Autor (2022)

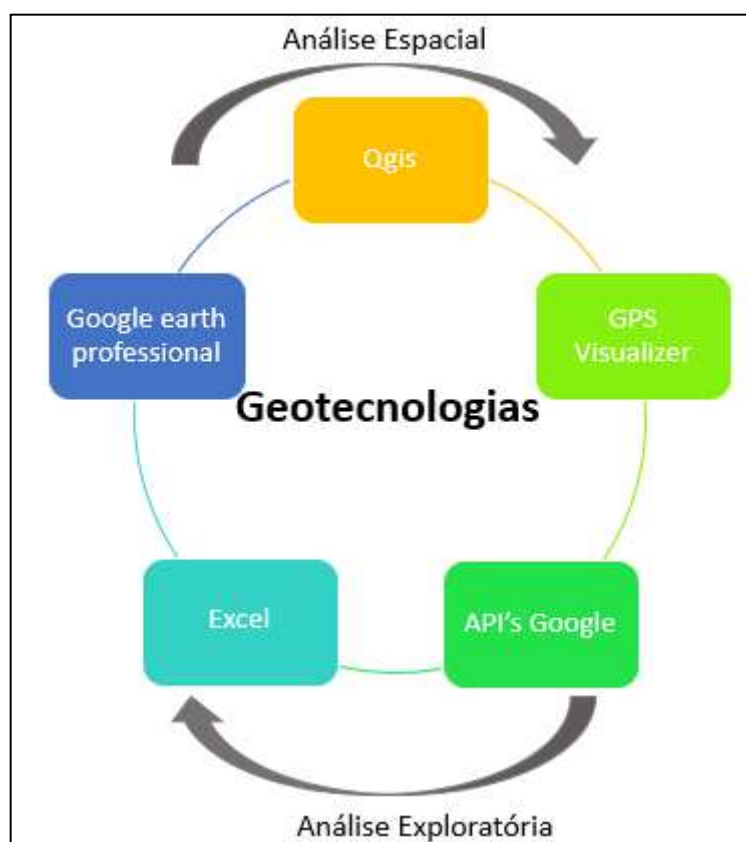
2.3.1 Softwares livres para o desenvolvimento de modelagem logística

Nesta seção, estão descritas algumas dentre as inúmeras ferramentas livres para a manipulação e a construção de resultados efetivos inseridos a rotas logísticas em ambiente SIG. As características de um SIG são constituídas por ferramentas que englobam o tratamento de informações brutas, manuseadas pela ação do homem, a partir de um conjunto de programas que disponibilizam a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados geográficos (CÂMARA et al, 2001). Assim, os programas constituintes à aplicação de manipulações em SIG, são capazes de disponibilizar a serviço da sociedade, resultados otimizados à oferta da demanda de desenvolvimento urbano, principalmente referente aos STs.

Desta maneira, a disposição e manipulação dos *softwares* livres tornam-se instrumentos eficientes à otimização e eficácia de atividades administrativas municipais ao alcance da comunidade. Isto porque, eles garantem a facilidade de uso e a efetividade da tarefa executada sem envolver gastos com aquisição de licenças para a operação. Assim, entre as principais ferramentas para a aplicação e a operacionalização de rotas otimizadas, estão a utilização de geotecnologias por meio de técnicas de AE, que por sua vez, tem a função de descrever os padrões constituintes das informações espaciais (topográficas, geográficas ou geométricas) utilizando ferramentas de geoestatística (SATRIA e CASTRO, 2016).

Como proposta à aplicação e utilização destes programas, a Figura 4 ilustra alguns dos *softwares* e ferramentas que podem desenvolver procedimentos de modelagem e processamento matemáticos, espaciais e estatísticos, a fim de possibilitar a análise espacial de dados multivariados da forma urbana a partir da compreensão dos STs (SCHOENAU e MÜLLER, 2017).

Figura 4– Relação dos softwares livres no processo de otimização de rotas.



Fonte: Autor (2022)

Assim, a associação e a integração destas diversas ferramentas computacionais podem ser aplicadas ao estudo de planejamento e infraestrutura urbana de transporte. Desta forma, visto a exemplificar e desenvolver funções aos *softwares* ilustrados na figura acima, a Tabela 4, constrói a relação entre a utilidade do programa e a finalidade de sua aplicação.

Tabela 4– Relação e definição de ferramentas livres utilizadas na pesquisa.

<i>Software</i>	Funcionalidade	Finalidade aplicadas ao projeto
Google Earth Professional	Apresentar informações espaciais com características tridimensionais de qualquer ponto da superfície terrestre	Coleta de dados georreferenciados que caracterizam a área de estudo a partir de aspectos de dimensões geométricas, topológicas e topográficas.’
Qgis	Multiplataforma em SIG capaz de visualizar, produzir, editar, analisar e construir mapeamentos de dados georreferenciados.	A partir de funções avançadas de um modo de extensão (<i>plugins</i>), o programa mapeia produtos cartográficos, processa e calcula a efetividade da roteirização a partir da projeção dos traços do caminho mínimo.
GPS Visualizer	Projeção e construção de mapas e gráficos a partir de dados geográficos georreferenciados que apresentam interoperabilidade de diversas fontes de entrada	Representação gráfica de perfis longitudinais dos trechos e rotas estudadas. Caracterização altimétrica dos greides viários.
API’s Google (<i>Application Programming Interface</i> Google)	Análises espaciais, autocorrelação espacial, geovisualização e coleta de dados exploratório multivariados.	Coleta de dados geodésicos a partir das análises de espaciais de dados multivariados.
Excel	Editor de planilhas eletrônicas com aplicabilidade de funções matemáticas e estatísticas para folhas de cálculo	Elaboração e codificação de base de dados das variáveis propostas e análises de cálculo estatísticos dos resultados obtidos

Fonte: Autor (2022)

Quando trabalhadas em conjunto, as ferramentas expressadas acima apresentam a funcionalidade de aumentar e expandir os detalhes dos dados coletados. Assim devido ao seu poder de conexão a partir da manipulação de diferentes ferramentas (Tabela 4), a caracterização dos dados de coleta espaciais tende a se aproximar do real. Conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados pode ser expandida e representada principalmente quando aplicados a problemas de origem geográficas.

2.3.2 Abordagens baseadas em SIG para o problema de roteirização

Ao utilizar ferramentas SIG para lidar com problemas que buscam otimizar rotas, verifica-se que esta tecnologia pode produzir relação à possibilidade de representar graficamente as soluções otimizadas sobre o mapa digital da cidade e/ou região analisada (SHRIVASTAVA et al, 2006).

Desta maneira, os SIGs-T (Sistemas de Informações Geográficas aplicadas aos Transportes), abordagem que deriva da classe dos Sistemas de Informações Geográficas, e que está estabelecida ao estudo e ao comportamento da área dos sistemas de transporte, é frequentemente utilizada a partir do desenvolvimento de *softwares*, *plugins* e *scripts* com abordagens específicas para atuar sobre os desafios oriundos dos processos logísticos e de transporte (TIANHENG et al, 2015).

Segundo Goodchild (2000), as aplicabilidades dos SIGs-T estão vinculadas à visualização da produção de mapas. Oriundas de uma análise exploratória multivariada de um inventário de dados, e também, à sua visão comportamental, que caracteriza os eventos de transporte como dinâmicos, decorrentes de um espaço em grande parte estático. Desta forma, devido ao incentivo, a valorização, as explorações e a democratização ao acesso a ferramentas tecnológicas e aprofundadas pré-existentes nesta pesquisa para a utilização de programas livres, são listados os principais *plugins* e *softwares* elencados no estado da arte para a execução dos problemas e das demandas dos STs.

Visto a especificar a funcionalidade dos itens que compõem as funções essenciais de um SIG-T, sabe-se que entre as diversas e principais execuções, estão: a realização de operações genéricas de SIG para aplicações SIG-T, a manipulação de matrizes, a análise de caminhos mínimos implementadas às variáveis de custo, a resolução de problemas de roteirização e por fim, a ação de clusterizar, regionalizar e particionar dados para análises espaciais de forma a permitir a visualização dos dados para os modelos de transporte. Por exemplo, podem ser utilizadas softwares e ferramentas como: GrassGIS, gvSIG, Spring e TerraView e finalmente QGIS.

Neste sentido, pode-se afirmar que uma das principais características de um *software livre* é a sua capacidade de suporte e implementação de *plugins* que possibilitam complementar a sua funcionalidade e conseqüentemente os seus resultados (QGIS, 2020). Assim, com o *QGIS* não é

diferente. Esta ferramenta está entre os *softwares* mais conhecidos e com maior número de expansão global. Essa universalidade é embasada pela vantagem que a plataforma proporciona ao possibilitar que qualquer pessoa desenvolva novos *plugins* a partir da programação de linguagens *C++* e/ou *Python*. A fim de entender a dimensão deste programa, no final de 2020, o repositório QGIS era composto por 1302 *plugins* com múltiplas e diversas variedades (QGIS, 2020).

Os *plugins* e os complementos existentes dentro do *software QGIS* para a resolução do problema de roteirização por caminho (mais curto ou mais rápido), fazem parte de uma revisão sistemática global de *ranking* e avaliações de resultados satisfatórios para o problema, e podem ser aplicados e trabalhados a partir da criação de uma camada vetorial de linhas (arcos) para construção de uma rede operacional viária de transportes, ou com aplicação de camadas com imagens de satélite atualizadas do *Open Street Map (OSM)* que realizam o detalhamento de possibilidades viárias da morfologia existente para a área de estudo existente. A Tabela 5, faz o detalhamento dos principais complementos utilizados a ser baixados dentro da plataforma *QGIS*.

Tabela 5 – Relação e avaliação dos *plugins* de roteirização direta no QGIS.

Plugins existentes	Downloads	Avaliações
<i>ORS TOOLS</i>	92338	68
<i>Online Routing Mapper</i>	69521	49
<i>PgRouting Layer</i>	39080	36
<i>QNet 3</i>	49240	44
<i>Hqgis</i>	22269	35
<i>OpenTripPlanner</i>	1942	8

Fonte: Autor (2022)

A Tabela ilustrada acima, possui a função de representar os *plugins* com melhores *rankings* e avaliações até o presente momento. Todos estes *plugins* resolvem, de alguma forma, o problema de roteirização de veículos, a depender da origem e da complexidade do problema inseridas ao projeto. Por fim, dentro do *software*, existem outras ferramentas com alta complexidade de obtenção de resultados para rotas. Estas, já estão inclusas na plataforma, não sendo necessário *download* complementar. Encontradas na aba de caixa de ferramentas de processamento, são elas: Grassgis (v.net.salesman , v.net.distance, v.net.path) e Análise de rede (caminho mais curto).

2.4 TEORIA DOS GRAFOS

A teoria dos grafos pode ser considerada como uma área de conhecimento da matemática que explora a relação espacial entre objetos geograficamente dispersos de um determinado conjunto. Suas origens partem do século *XVIII*, onde Leonhard Euler por meio do problema conhecido como as ‘Sete pontes de Königsberg’, objetivava cruzar todas as sete pontes da cidade, de forma que o trajeto a ser percorrido não obtivesse repetições. Ou seja, as restrições englobavam a passagem pelo caminho apenas uma vez, e em sequência contínua. Posteriormente, a teoria dos grafos foi submetida a diversos estudos de aplicações e desenvolvimento. Desta forma, atualmente ela pode ser inserida à modelagem de muitos problemas computacionais. Assim, a aplicação desta teoria, torna-se uma das técnicas que apresentam maior viabilidade e funcionalidade de resultados a partir da abordagem e resolução dos problemas de roteirização e transporte (BIGGS, 2012).

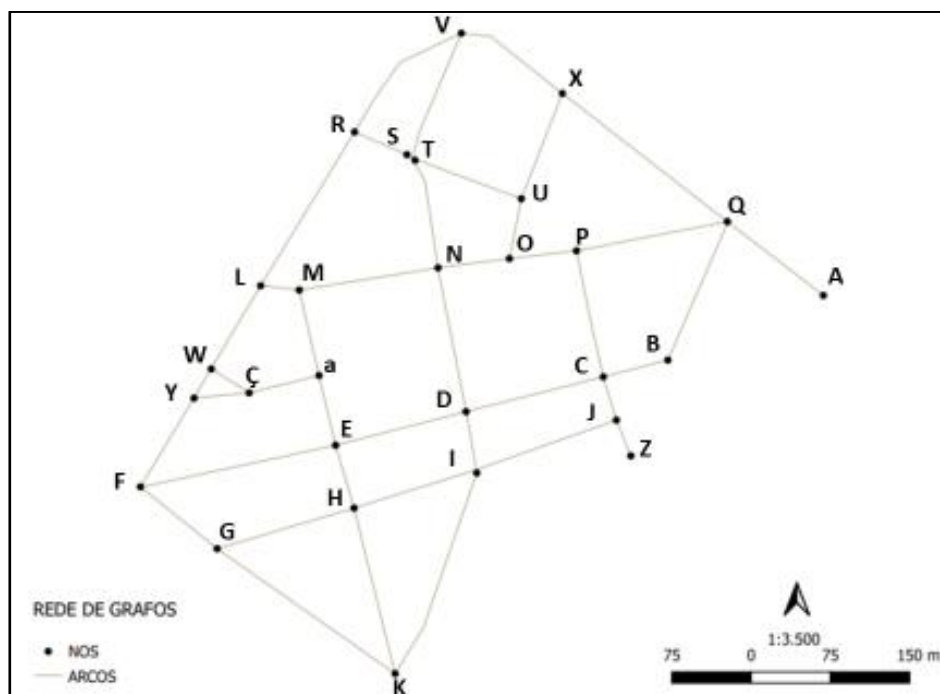
2.4.1 Grafos

Grafo por definição, é um par de conjuntos compostos por uma coleção de vértices, também chamados nós, e por uma coleção de arestas, conhecidas como arcos. Desta maneira, a representação de cada arco é dada por um par ordenado de vértices. De forma concisa, o primeiro vértice (nó) do par ordenado representa o ponto de início do arco e o segundo vértice (nó) o ponto final, sendo o intervalo entre estas duas localidades sua extensão total. A representação de um grafo é dada por $G = (V, A)$ onde G é a representação de um grafo formado por V que é o número de vértices (nós) de um conjunto não vazio e A representados pelas arestas (arcos) que é a exibição de um subconjunto de pares não ordenados oriundos de V . Portanto, em outras palavras, se G é um grafo, $V(G)$ e $A(G)$ são os conjuntos de vértices e arestas de G , respectivamente (LUCCHESI, 1979; GROSS E YELLEN, 1998).

Em estudos de engenharia de transporte, mais especificamente em pesquisas de roteirização pela metodologia do caminho mínimo, a representação cartográfica mais utilizada é o mapa de grafos. Para elaborar um mapa de grafos, é necessário identificar na infraestrutura viária analisada, um conjunto de nós e de arcos. Os nós são os pontos de interseção entre caminhos possíveis (ou seja, são as esquinas, pontas de quadras, etc.). Os arcos, por sua vez, são uma representação geométrica do caminho possível entre dois nós consecutivos (HUTCHINSON, 1979).

É importante lembrar que, na literatura da teoria dos grafos, os arcos são representativos e não precisam seguir a mesma geometria da infraestrutura viária urbana. Assim, um mapa de grafos, conforme ilustra a Figura 5, apresenta em sua interface gráfica um espaço geográfico definido no qual existem pontos/vértices (nós) ligados por linhas/arestas (arcos). Esta configuração representa a ideia do esforço necessário para percorrer caminhos entre dois nós distintos. De acordo com forma nominal da literatura, os nós recebem uma identificação textual (letra) e os arcos uma identificação de trecho (segmento do tipo AB, fazendo referência ao arco entre os nós A e B) (HUTCHINSON, 1979; WRIGHT et al, 1997).

Figura 5– Mapa de grafos do distrito de Miraporanga-MG.

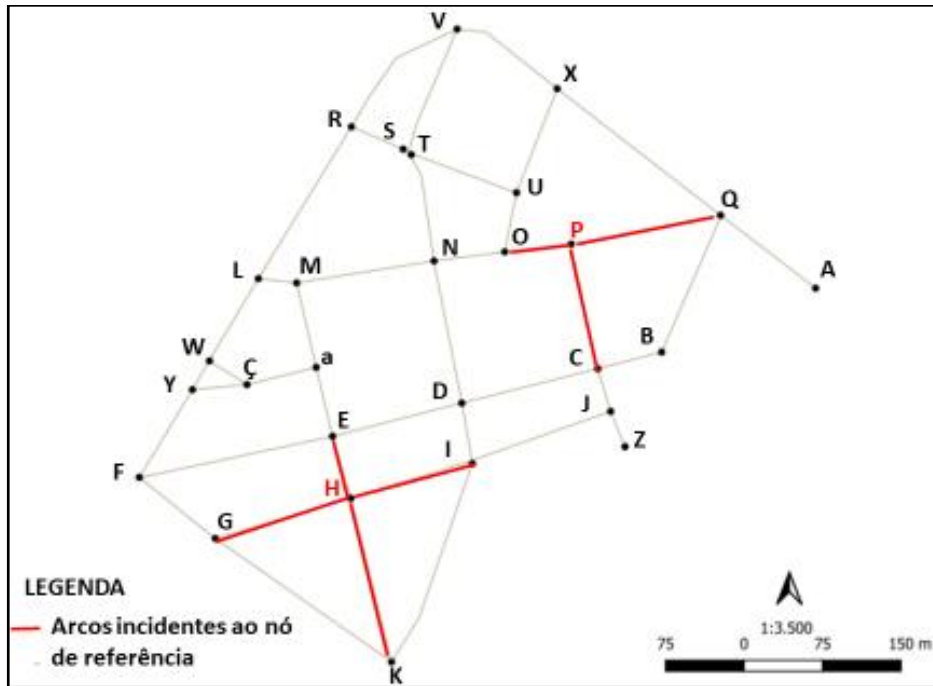


Fonte: Autor (2022)

A fim de explorar os conceitos inseridos à formulação base da composição de um grafo descrito acima, sabe-se que um nó u é adjacente a um nó v se $\{u, v\}$ é um arco, ou seja, $\{u, v\} \in E$. O conjunto de nós adjacentes a v é $A_{dj}(v)$. Desta forma, os arcos aplicados a expressão $(e = \{u, v\})$ mostra incidência com os nós u e v , sendo estes, as extremidades de (e) . A partir disto, os vértices ou nós, podem ser classificados de acordo com o seu grau de adjacência e incidência das arestas ou arcos

que compõem um grafo. Desta forma, o grau de um nó (u) é o número de arcos incidentes com o nó (u) (Figura 6).

Figura 6 – Mapa de grafos referente à incidência de arcos para a classificação de grau dos nós de uma rede.



Fonte: Autor (2022)

Assim, ao analisar a figura acima, percebe-se que o nó de nomenclatura P, é de origem ímpar, uma vez que apresenta grau 3, justificados pela incidência de 3 arcos ao nó de verificação. A respeito do nó H, este é classificado como um nó de grau (4) par, pois o mesmo é constituinte de 4 arcos incidentes à sua origem.

2.4.1.1 Tipos de Grafos

Uma rede de grafos, pode apresentar diversas composições e características individualizadas oriundas das suas localizações de nós e arcos para o conjunto analisado. Referente a isto, os parágrafos subsequentes explanam os tipos de grafos existentes juntamente com suas funcionalidades para o estudo e análise de uma rede de transporte.

Quando um grafo apresenta como característica a relação de mesmo grau para a análise de todos os nós da rede, trata-se de um grafo regular. Já o grafo completo, é nomeado assim por se tratar de um grafo de composição simples em que todo nó é adjacente a todos os outros nós da rede de análise.

Um grafo bipartido é um grafo G cujo conjunto de vértices pode ser fracionado, ou bipartido, em dois subconjuntos X e Y , de modo que cada aresta tenha uma extremidade em X e uma extremidade em Y . Assim, tal partição (X, Y) é chamada de bipartição do grafo. Já um grafo bipartido completo é um grafo com bipartição (X, Y) em que cada vértice de X é adjacente a cada vértice de Y ; se $|X| = m$ $|Y| = n$, tal grafo é delimitado por $X_{m,n}$. Uma caracterização importante de grafos bipartidos são suas características em termos de ciclos ímpares. Assim um grafo é bipartido se, e somente se, não contém nenhum ciclo ímpar (BIGGS, 2012).

Um grafo $G = (Y, E)$, é um grafo de comparabilidade se for transitivamente orientável. Já um grafo é chamado de grafo de co-comparabilidade se o complemento de G é transitivamente orientável. Portanto, um grafo G é chamado de grafo de permutação apenas se G for uma comparabilidade, e o complemento de G também for um grafo de comparabilidade (NETTO, 2012).

Por conseguinte, um grafo valorado, conhecido também por grafo ponderado, é um grafo que possui como características as relações entre o conjunto de nós e o conjunto de arcos a um conjunto de números (NETTO, 2012; WRIGHT et al, 1997). De forma a exemplificar, em situações de análise para área de engenharia, o conjunto de números pode considerar grandezas físicas como altitudes, fluxo, distâncias, associadas à localização geográfica (estradas, bairros, ruas) que visam definir os nós e os arcos do grafo.

Digrafo, também conhecido como grafo dirigido, orientado ou direcionado, é um par ordenado representado por $G = (V, A)$ onde V é o conjunto delimitado pelos nós e A os pares ordenados da representação dos nós, que por nomenclatura, representa os arcos. Sua nomenclatura é bem intuitiva, uma vez que os grafos direcionados são representados por arcos que apresentam uma única direção de caminho permitido. Assim, se G é direcionado, o número de arcos que partem e iniciam a partir de cada nó, necessitam ser iguais (LUCCHESI, 1979; GROSS E YELLEN, 1998). Exemplificando, se um arco AB é direcionado, logo, é permitido realizar o caminho do nó A para o B , mas não é

permitido o deslocamento de B para A. De forma prática para o ambiente urbano, esse tipo de grafo é representado por ruas de sentido único.

Já o grafo não direcionado possui como restrição a condição de todos os nós possuírem grau par, sendo este grau, classificado como um número par de arcos incidentes a cada nó. Um exemplo de sua aplicação em redes de transporte, é a composição de um ambiente urbano em que todos os elementos da rede (ruas) apresentam sentido duplo.

O grafo misto, por sua vez, é a junção dos dois métodos citados acima. Neste tipo de grafo, a complexidade estabelecida é muito maior, visto que os elementos apresentam heterogeneidade em função de seu comportamento de direção (KAWAMOTO, 2015). Dentro da mesma rede, para este tipo de grafo, existirão arcos que limitam o processo de deslocamento em um sentido, e arcos sem restrições de deslocamento entre nós. De forma prática, este tipo de problema se encontra quando se analisa as dimensões viárias de uma cidade por completo. Visto que esta apresenta características de vias com sentido único e duplo.

Referente a esta complexidade de análise de uma rede de transportes, muitas vezes, torna-se necessária a análise de subgrafos oriundos de um grafo base. Desta forma, um grafo H é um subgrafo de um grafo G, se e somente se, $V(H) \subseteq V(G)$ e $A(H) \subseteq A(G)$. Se $A(H) = \{(n, u) \mid (n, u) \in A(G) \text{ e } n, u \subseteq V(H)\}$ então H é um subgrafo de G. Por fim, um multigrafo, representado por $G(V, A)$ pode ser classificado assim, quando existirem múltiplos arcos entre os pares de nós do grafo G (NETTO, 2012; KAWAMOTO, 2015).

2.4.1.2 Grafos eulerianos

Um grafo euleriano é um grafo G, que apresenta um ciclo na rede caracterizado pela restrição de percorrer todos os arcos de (G). A composição deste ciclo ou caminho, é considerada como ciclo euleriano. Assim, um caminho ou ciclo Euleriano em um grafo é um caminho que usa todos os arcos do grafo, percorrendo um circuito, cuja condição necessita iniciar e finalizar este caminho no mesmo nó do grafo (G), visitando todos os arcos apenas uma vez (WILSON E WATKINS, 1990).

Referente a isto, existem várias maneiras de descobrir a existência de Caminho de Euler. Sabe-se que qualquer caminho em um grafo está diretamente relacionado à composição de grau dos nós que

pertencem a este grafo. Desta forma, Euler estabelece duas condições para a verificação da existência de um circuito Euleriano ou caminho em um grafo, respectivamente. Estas condições, são teoremas de verificação que possuem como objetivo analisar as características do grafo, de forma a classificá-lo como Euleriano ou não. A primeira condição afirma que um grafo não direcionado apresenta pelo menos um caminho de Euler, se e somente se, o grafo estiver conectado e apresentar dois ou zero nós com grau ímpar. Já um grafo (G) é considerado um grafo Euleriano se, e somente se, apresentar em cada nó do grafo uma classificação de grau par (BOLLOBÁS, 1998).

2.4.1.3 Grafos Hamiltonianos

Um caminho ou ciclo hamiltoniano é um caminho, que ao ser percorrido, utiliza cada nó do grafo de análise exatamente uma vez, com exceção do primeiro nó, que para o caso específico é o nó de ponto inicial e final, ou seja, sendo percorrido duas vezes. Assim, o grafo que contenha um caminho hamiltoniano, pode ser chamado de grafo hamiltoniano. De forma concisa, um grafo é considerado hamiltoniano quando para um grafo (G) existir um ciclo que inclua todos os nós de G. Entretanto, ao contrário dos Grafos Eulerianos, para Grafos Hamiltonianos, as condições de verificação são na maioria dos casos, suficientes para a determinação da característica de um grafo, porém não são necessárias (DIESTEL, 2017). Assim, como principal condição de verificação hamiltoniana encontra-se que, um grafo (G) é hamiltoniano se ele possuir uma ordem $p \geq 3$ sendo o grau de seus nós $\geq p/2$ para cada nó constituinte do grafo G. Um exemplo de sua aplicação é o problema do caixeiro viajante, tema esse que será apresentado na Seção 2.8 deste trabalho.

2.5 PROCESSO DE ALOCAÇÃO POR CAMINHO MÍNIMO

Neste contexto, um dos principais expoentes de aplicação das geotecnologias dentro da engenharia de transportes, é a roteirização de veículos (NOVAES, 1988). Este processo visa configurar soluções que percorram um caminho mínimo, por meio da determinação de uma ou mais rotas a serem percorridas por uma frota, objetivando realizar adequações à abrangência de determinado serviço ou produto vinculado a um sistema de transporte (ROESS et al, 2004).

Assim, os processos de algoritmos para cálculo do caminho mínimo, visa determinar a rota de menor tempo, custo e distância por meio de um ou vários pares de origem e de destino de uma rede de

fluxo (grafo). Neste contexto, existem diversas formulações de rede para solucionar o problema de caminho mínimo (STEENBRICKS, 1974; JENSEN, 1987). Entretanto, para estabelecer os resultados relacionados às configurações da rede de transporte, a metodologia e os processos viabilizados são realizados por meio de um nó para outro nó, ou, de um nó para todos os outros nós da rede. Visto que a restrição inclua que todos os arcos de um grafo sejam percorridos uma vez (MORLOK, 1978; ROESS et al, 2004).

Neste contexto, as variáveis com maior significância na roteirização pelo método do caminho mínimo são de ordem sintática, ou seja, associadas a atributos morfológicos vinculados à geometria e distribuição espacial dos nós e dos arcos. Entre estas variáveis, destacam-se a conectividade dos nós (medida pela quantidade de nós filhos em relação a um nó pai), o tipo de nó (extremidade ou interior), o tempo de rota nos arcos, a distância ou comprimento representativo dos arcos e a integração dos mesmos (medida pela quantidade de arcos que chegam ou saem de um arco de referência) (MORLOK, 1978; HUTCHINSON, 1979; WRIGHT et al, 1997; ROESS et al, 2004; KAWAMOTO, 2015).

A conectividade é um parâmetro associado aos nós. De forma geral, pode ser calculada como sendo a quantidade de linhas (ou arcos) que interceptam determinado nó (ROESS et al, 2004). A integração, por sua vez, é um valor que faz referência aos arcos. Esta pode ser obtida pelo somatório da quantidade de arcos que chegam a um arco de referência (MORLOK, 1978). Assim, as características mais importantes na análise de rede dos STs, podem se estruturar a partir de uma organização tripla de resultados, que estão configurados principalmente ao tempo de viagem, à distância percorrida e por fim, às influências dos custos operacionais envolvidos.

2.5.1 Caminho mínimo entre todos os pares de vértice de uma rede

O problema de caminho mais curto de fonte única pode ser definido por (G, l) , onde $G = (V, A)$ é um grafo direcionado ponderado, V é o conjunto de n vértices, A é o conjunto de arcos, s é o vértice de origem, e $l: A \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função de comprimento, onde $l(u, v)$ é o comprimento do arco (u, v) . Assim, um caminho mais curto é um caminho de arcos com o comprimento total mínimo. Referente à solução deste problema, a comunidade científica tem implementado diversos estudos que visam otimizar os resultados de caminho mínimo para grafos não direcionados, direcionados ou mistos

(LUCCHESI, 1979; BIGGS, 2012). Desta forma, a próxima seção discorre dos principais algoritmos elencados pela literatura para a execução de caminho mais curto.

2.6 PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA ALOCAÇÃO DO CAMINHO MÍNIMO

A complexidade de modelos matemáticos para a otimização de rotas que buscam o trajeto de caminho mínimo está estruturada a partir de diversas técnicas de resolução que se caracterizam pelo tipo e pela complexidade de cada problema. Assim, conseqüentemente há uma pluralidade de aplicações oriundas de características pela natureza e pelo processo do método de resolução (BRYMAN, 1989).

Desta forma, uma das técnicas que busca solucionar os problemas matemáticos aplicados a processos de roteirização é a aplicação da programação linear. Onde utiliza-se métodos de resoluções com restrições e funções lineares vinculados à programação dinâmica ou programação inteira. Assim, de acordo com Gomes e Ribeiro (2013, p. 59) “a programação linear lida basicamente com o problema de alocar recursos escassos a atividades que por eles “competem” entre si, e cujo modelo se representa por meio de expressões lineares.” Em suma, a programação linear alça como objetivo principal descobrir a melhor distribuição de processos dos recursos e variáveis disponíveis visando obter um resultado ótimo do objetivo proposto.

Elwany et al (2011) discorre sobre a distribuição das técnicas de modelagens matemáticas que buscam construir métodos que solucionem os problemas proeminentes às redes logísticas. Desta maneira, as técnicas de modelagem podem ser distribuídas e categorizadas em função do tipo de fluxo do problema de roteirização (redes reversas ou redes diretas) e do tipo de modelo aplicado (programação não linear, programação linear inteira binária ou programação mista). Assim, algumas das técnicas de soluções algorítmicas elencadas pela sociedade científica, são consideradas pilares fundamentais para o desenvolvimento de problemas de roteirização.

A saber, estas técnicas de solução necessitam estar adequadas à individualidade e à característica da rede. Podendo ser manuseadas de acordo com o tipo de modelo da rede logística (direcionada, não direcionada, mista), com as variáveis de restrições e decisões elencadas à aplicação para o

desenvolvimento com maior peso para a execução e a resolução do serviço, e por fim, às escolhas dos algoritmos para manipulação e produção dos resultados propostos (Figura 7).

Figura 7– Enquadramento da natureza e especificidade do problema.



Fonte: Autor (2022)

Desta forma, segundo Peres e Castelli (2021) o processo de solução com aplicabilidade e utilização de algoritmos são seccionadas em três categorias distintas:

- 1) Os algoritmos exatos, que possuem como funcionalidade e produto final a obtenção de soluções ótimas e exatas, sendo aplicados a problemas com variáveis e dados limitados, uma vez que para a obtenção da solução ótima, faz-se necessário a avaliação e a análise criteriosa e racional de todas as informações propostas;
- 2) Os algoritmos heurísticos, por sua vez, são problemas com grau de limitação um pouco maior, uma vez que analisam um conjunto maior de variáveis e dados do problema que resultam em técnicas de aplicação cognitiva de decisões não racionais. Eles buscam por meio de aproximação, encontrar melhores soluções para os problemas de roteirização em um menor tempo de análise. Entretanto, não são consideradas soluções ótimas e exatas. Nesta classe, se enquadram problemas de grande complexidade computacional, pertencentes à classe NP-Difícil;
- 3) Por fim, a metaheurística, inserida entre outras técnicas, à aplicação de algoritmos genéticos, que são métodos de resolução computacional que otimizam iterativamente um problema de roteirização, não garantindo também uma solução ótima. Neste processo em geral, obtêm-

se resultados mais satisfatórios que os heurísticos, entretanto as soluções de processamento demandam maiores trabalhos, habilidades e tempo.

A Figura 8, ilustra o detalhamento das principais vantagens e desvantagens da aplicação e escolha de cada método de solução computacional.

Figura 8– Processo com técnicas de solução para problemas de roteirização a depender da natureza da demanda.

Algoritmos exatos	Heurística	Metaheurística
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Vantagem</u> Solução ótima • <u>Desvantagem</u> Limitação de variáveis 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Vantagem</u> Alta capacidade de variáveis trabalhadas • <u>Desvantagem</u> Resultados baseados em aproximação 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Vantagem</u> Alta capacidade com resultados satisfatórios • <u>Desvantagem</u> Processamento com alta demanda de tempo e trabalho

Fonte: Autor (2022)

Por conseguinte, a otimização pode ser resumida como uma coleção de técnicas e algoritmos para encontrar a melhor solução possível (ótima ou quase ótima) iterativamente. De uma busca perspectiva em relação a abordagem, eles podem ser organizados em três classes de métodos: enumerativo, determinístico e estocástico (PERES E CASTELLI, 2021).

Os métodos enumerativos são baseados em uma abordagem de força bruta. Isto porque este método inspeciona todas as soluções possíveis no espaço de pesquisa. Por um motivo compreensível, ele sempre encontrará a solução global ideal. No entanto, computacionalmente falando, essa abordagem só funciona em pequenos e limitados espaços de busca. Por outro lado, os problemas mais desafiadores, com uma vasta pesquisa de espaço, podem exigir uma quantidade enorme de tempo para listar todas as soluções, algo que não é viável a maior parte do tempo. Nestes casos, abordagens diferentes com outros métodos de resolução tornam-se necessárias.

Os métodos determinísticos podem ser vistos como uma extensão da abordagem enumerativa. Eles usam o conhecimento do problema para desenvolver maneiras alternativas de navegar no espaço de pesquisa. Métodos determinísticos são excelentes método de resolução de problemas a

partir uma ampla variedade de situações, mas eles são dependentes do problema. Consequentemente, eles têm dificuldades de aplicação quando não é possível determinar o conhecimento do problema de forma eficaz. Assim este método recebe esta classificação porque os valores de seus parâmetros e a abordagem de inicialização determinam seu resultado. Em outras palavras, se uma configuração particular for usada, a solução de saída sempre será a mesma.

Os métodos estocásticos são agnósticos quanto ao problema e seus resultados incluem incerteza. Eles se movem no espaço de busca usando um modelo de navegação sofisticado, aplicando uma abordagem probabilística para explorar o espaço de busca. Desta forma, estes métodos são baseados em aspectos de aleatoriedade, onde a solução retornada quase sempre apresenta valores diferentes. Portanto, não é possível determinar qual será a solução final e seu desempenho. Eles são uma excelente alternativa em cenários onde os dados são imprevisíveis, e onde o conhecimento do problema não pode ser usado e aplicado às outras abordagens (enumerativos e determinísticos).

Portanto, para a aplicação destes modelos e técnicas de solução, torna-se necessário a construção racional de uma sequência finita de processos que devam ser reproduzidas em uma ordem lógica que visam determinar a rota de menor distância, tempo ou custo entre os pares de vértices de uma rede de grafos. Esta sequência gerada, torna-se conhecida como algoritmos de caminho mínimo. Assim, nas subseções seguintes, estão descritos alguns dos algoritmos mais funcionais e usuais da comunidade científica para o problema de alocação por caminho mínimo.

2.6.1 Algoritmo de Floyd-warshall

O algoritmo de Floyd-Warshall é uma das variantes da programação dinâmica. É um processo que utiliza o método de resolução de problemas direcionada à solução obtida a partir de uma decisão inter-relacionada. Isso significa que as soluções são formadas a partir de processos que se comportam como ciclos de desenvolvimento da etapa de coleta anterior. Desta forma, o algoritmo Floyd-Warshall compara cada variação de rota com a distância dos arcos de cada nó, que se desenvolve para o ponto de destino. Este processo, é capaz de construir a distância entre os nós (pontos de intersecção) de toda rede de forma sequencial. Assim, a linha ou arco conectado entre os nós tem um valor inteiro do número que indica o peso da distância. Por fim, o algoritmo Floyd-

Warshall processa e desenvolve uma rota onde cada linha ou arco resulta em um cálculo material para determinar a rota mais curta (BRODNIK et al, 2021).

Visto a exemplificar sua aplicação à composição de uma rede de grafos, dada uma rede $G(V,A)$ com um conjunto de nós $V = \{1,2,3,\dots, n\}$ e um conjunto de arcos $A = \{(i,k) : i, k \in V, i \neq k\}$. Na condição de $|V|=n$, onde como restrição do grafo (G), há a necessidade de existir pelo menos um ciclo na rede, constata-se então que, para este problema em específico, o algoritmo Floyd Warshall torna-se a técnica de solução mais específica. Sendo assim, um dos melhores algoritmos para encontrar o caminho mínimo. Ou seja, o caminho mais curto entre cada dois nós de composição da rede.

O algoritmo de Floyd pode ser enquadrado a um processo lógico baseado em um procedimento que contempla quatro etapas distribuídas a partir de duas matrizes quadradas programadas à realização de um cálculo que visa manter os custos do caminho mais curto e conseqüentemente as rotas mais curtas dos arcos de um grafo. Ou seja, entre cada dois nós da rede (NETTO, 2012). Entretanto, este algoritmo é programado e condicionado a encontrar os valores dos arcos dos caminhos da rede, e conseqüentemente a distância entre os pares de nós pertencentes ao grafo. Ou seja, o algoritmo descreve as distâncias existentes entre os pontos (nós) de uma rede, mas não encontra a sequência lógica que deve ser percorrida.

2.6.2 Algoritmo de Dijkstra

O Algoritmo de Dijkstra é um algoritmo para encontrar os caminhos mais curtos entre os nós de uma rede de grafos. Desta forma, o processo é baseado no princípio em que os valores dos arcos mais precisos substituem gradualmente uma aproximação da distância correta até que a distância mais curta seja alcançada. Este algoritmo é considerado um processo com natureza simples que apresenta resultados satisfatórios em grafos direcionados e não direcionados com pesos não negativos. A relação de pesos não negativos, torna este algoritmo uma importante ferramenta com aplicabilidade em transportes, uma vez que as distâncias entre os nós de uma rede representada pelos arcos descrevem as distâncias e o tempo de percurso de uma cidade, bairro ou comunidade a ser percorrida. Assim, o tempo e o processo computacional podem ser desenvolvidos para a aplicação do algoritmo de Dijkstra (Equação 3) (GOODRICH et al, 2004).

$$O[n(A) + n(V)] \log(n(V)) \quad (3)$$

Onde:

O (n) = complexidade do algoritmo;

A = arcos/ segmentos de referência da rede de grafos;

V = vértices ou nós da rede de grafos .

2.6.3 Algoritmo de Fleury

O algoritmo de Fleury é projetado para encontrar um caminho de Euler em um grafo não direcionado. Portanto, o grafo tem um caminho de Euler se for possível começar o percurso em um nó e se deslocar ao longo do grafo com a restrição e a condição de percorrer cada arco do grafo sem que haja repetição de deslocamento no mesmo arco (AHUJA et al, 1993).

De forma a descrever as origens para a aplicação deste algoritmo, sabe-se que um grafo finito $G(V,A)$ contém um caminho de Euler se, e somente se, G for conectado e apresentar no máximo dois vértices de grau ímpar. Assim a forma e o processo também descrevem um procedimento para encontrar o caminho consistindo em construir um circuito simples, eliminando os arcos usados e encontrando novos circuitos no grafo remanescente, que, posteriormente, constrói os novos circuitos nos nós denominados apropriados. Assim, a ideia básica é que ao desenhar um circuito de Euler, todos os arcos percorridos não sejam usados novamente. Então, a qualquer momento da projeção do desenho, com todos os arcos percorridos excluídos, verifica-se que os arcos restantes devem estar sempre em conectividade. O processo deve começar com um vértice de grau ímpar, caso o grafo apresentar somente graus pares, pode-se optar por uma escolha aleatória.

2.6.4 Algoritmo de Hierholzer

O algoritmo de Hierholzer é específico para grafos direcionados. Desta maneira, a ideia básica do algoritmo de Hierholzer é a construção gradual do ciclo Euleriano de forma a construir círculos disjuntivos. Ele começa com um nó aleatório e, em seguida, segue uma borda não visitada arbitrária

até um vizinho. Esta etapa é repetida até que se retorne ao nó inicial. Isso produz um primeiro círculo no gráfico. Se este círculo cobrir todos os nós, é um ciclo Euleriano e o algoritmo está concluído. Caso contrário, escolhe-se outro nó entre os nós dos ciclos com arcos não visitados e constrói-se outro círculo. Por escolha de arcos na construção, o novo círculo não contém nenhum arco do primeiro círculo, ambos são disjuntos. No entanto, ambos os círculos devem se cruzar em pelo menos um nó por escolha do nó inicial do segundo círculo (AHUJA et al, 1993).

Portanto, pode-se representar ambos os círculos como um novo círculo. Para fazer isso, é necessário estabelecer os nós do primeiro círculo e substituí-los ao nó inicial pela sequência de nós complementares. Assim, integra-se círculos adicionais no primeiro círculo. Se o ciclo estendido incluir todos os arcos, o algoritmo será concluído. Caso contrário, podemos encontrar outro ciclo para incluir.

2.6.5 Algoritmos Genéticos

O algoritmo genético foi desenvolvido por John Holland em 1975 e usa a ideia de genética de "sobrevivência do mais apto" com o objetivo de produzir soluções ótimas para a resolução de problemas como o problema do caixeiro viajante (PCV), problemas de programação de máquinas, problemas de roteamento de veículos, problemas de origem genéticas e muitos outros. Desta maneira, estes algoritmos têm se mostrado eficazes ferramentas para soluções de problemas com elementos de otimização de funções, a partir de diversas escalas de resoluções exatas aplicadas a diferentes áreas de conhecimento.

De acordo com Goldberg (1988), o objetivo dos algoritmos genéticos é estruturar a aplicabilidade de eficiência em diferentes ambientes, com a finalidade de evitar repetições de rotas nos programas utilizados. Os algoritmos genéticos não são limitados por restrições, apresentando simplicidade computacional com resultados satisfatórios de aplicabilidade.

O algoritmo usa um método de codificação de uma solução chamada "*Random Keys*" que foi desenvolvido por Bean (1992), onde a técnica é projetada e desenvolvida para resolver o problema de produzir soluções inviáveis durante o percurso de um itinerário ou roteirização. Visto que em

muitos casos, algumas localidades geográficas são visitadas mais de uma vez, enquanto algumas não são visitadas.

Assim, uma característica importante que relaciona o algoritmo genético com um problema de roteirização a ser resolvido é o método de avaliação da aptidão de cada “cromossomo” (solução). O método usado para este problema específico consiste primeiramente em calcular a distância euclidiana total percorrida por todos os veículos no itinerário real, a quantidade de tempo que cada veículo gasta para a execução do serviço, e por fim, é calculado o peso que cada veículo pega ao longo do serviço. A partir desses cálculos pode-se determinar o quanto cada veículo excede o limite de tempo, o limite de peso e o retrabalho. A aptidão da solução é então calculada por uma função da distância percorrida em combinação com uma função de penalidade por inviabilidade em relação ao peso e ao tempo.

O objetivo final é baseado no cálculo de planejamento de uma frota, onde a premissa se fundamenta na operação de que os veículos visitem todos os pontos com localizações geográficas dispersas exatamente uma vez e a distância total percorrida é minimizada. Os veículos podem ser limitados por uma capacidade de carga ou um tempo máximo gasto na rota.

No entanto, de acordo com Davis (1991), a robustez de um algoritmo genético e seu desempenho para problemas de roteirização com elementos individuais e particulares podem estar inversamente relacionados. Isto porque os algoritmos genéticos são robustos na medida em que podem ser usados para resolver vários tipos de problemas diferentes sem alterar o algoritmo. Assim uma pequena mudança no problema de roteirização, pode tornar um algoritmo não robusto inoperante (DAVIS, 1987).

Portanto, os problemas de roteirização de veículos são complexos de resolver visto às inúmeras restrições e individualidades de cada problema, principalmente quanto à otimização. Desta forma, muitos trabalhos se fundamentam em uma aproximação da solução ótima (HAIMOVICH et al, 1988).

2.7 TAXONOMIA DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

Problemas de otimização combinatória (POC) são eficientemente implementados quando podem ser selecionados um conjunto de dados e variáveis finitas, e deste conjunto determina-se o melhor subconjunto que satisfaça os critérios para a determinação e a resolução de um problema proposto. Estes problemas, em sua maioria, são desafiadores porque possuem alta complexidade de formulação. Sendo geralmente difíceis de resolver, principalmente pela característica específica e customizada dos dados e variáveis a serem trabalhados e correlacionados (BAZARAA et al, 2009).

Além disso, a escolha do algoritmo que melhor solucione a proposta do problema de roteirização necessita de uma adequação específica, visto a definir sua melhor configuração. A complexidade torna-se ainda maior devido à existência de vários *solvers* caracterizados por diferentes parametrizações (SCHRIJVER, 1986). Assim, as metaheurísticas são amplamente reconhecidas como ferramentas de resolução para os problemas de otimização combinatória (POC), principalmente quando aplicadas às redes logísticas de um sistema de transporte. Entretanto, mesmo para os problemas de otimização difíceis, em algumas situações, as aplicações destes métodos são os principais mecanismos viáveis e funcionais à abordagem e manuseio para a solução de roteirização. Isto devido à dimensionalidade do espaço de busca que caracteriza os problemas de otimização combinatória em questão.

Considerando que um problema de função é uma extensão da tomada de decisão, então pode-se afirmar que, quaisquer tipos de dados podem ser desenvolvidos. Assim, um problema de otimização (PO) é uma classe de problemas resolvidos a partir da construção de métodos de otimização que visam encontrar uma solução ótima ou aproximada em um vasto conjunto de soluções possíveis. Consequentemente, a saída de um problema de otimização é a própria solução.

Desta maneira, os problemas de otimização são divididos em duas categorias de problemas: o contínuo e os problemas combinatórios. Problemas de otimização contínua são compostos de variáveis de decisão contínuas e podem gerar um número infinito de soluções válidas. Problemas de otimização combinatória são definidos por variáveis de decisão discretas de seus elementos. Assim, a solução de um problema de otimização combinatória é representada por um arranjo desses elementos. Uma vez que, uma solução é uma combinação (ou permutação) de elementos, para esta categoria de problema, tem-se um número finito de soluções (SHERAFAT, 2004).

Por fim, a definição de regras de codificação entre as combinações ou permutações dependerá das necessidades e do grau de complexidade do problema e de sua representação de solução. De forma explícita, a codificação e programação do processo dependerá dos pesos das variáveis adotadas ao projeto, e principalmente das características da rede de transporte analisada. Seja ela direcionada, não-direcionada ou mista, ou solucionando problemas de soluções com técnicas aplicadas a métodos de resolução a partir de problemas de roteamento em nós ou em arcos.

2.8 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO EM NÓS

Aspectos logísticos abrangentes ao fornecimento e recolhimento da cadeia produtiva de insumos, estão cada vez mais frequentes. Assim a métrica é fundamentada ao cumprimento e ao deslocamento de entregas com localizações geográficas dispersas. Uma das principais e mais usuais metodologias para atingir resultados de otimização de rotas entre diferentes localidades, é realizada por meio do estudo de uma rede de grafos aplicada ao comportamento de nós, que para este problema, é representado pelos endereços iniciais e finais de cada viagem. O problema de roteirização em nós é aplicado e enquadrado a estas situações, onde o principal objetivo é baseado na construção de roteiros entre nós (destino) de cada itinerário, independentemente do trajeto, arco ou via que ele percorrerá.

2.8.1 Problema do Caixeiro Viajante (PCV)

O problema do caixeiro viajante (PCV) é um problema desafiador em otimização, que consiste no estudo de dois elementos, um vendedor, que é responsável pela condutibilidade de uma viagem e percursos, e um conjunto de cidades, representados pelas diferentes localidades a serem percorridas pelo vendedor. De forma sucinta, o vendedor tem que visitar cada uma das cidades partindo de uma determinada (por exemplo, a cidade de origem) e retornando à mesma cidade. Desta maneira, o desafio do problema do caixeiro viajante é objetivar os custos mínimos de distância para a roteirização (BERTSIMAS, 1988).

O problema do caixeiro viajante pode ser descrito da seguinte forma: $PCV = \{(G, f, t): G = (V, E)$ onde G deve ser considerado um grafo completo. Satisfazendo estas condições, f é uma função $V \times V$

→ Z , $t \in Z$. Assim, um grafo G que contém uma roteirização do caixeiro viajante com custo, não deve exceder t (BOWLER et al, 2003).

A utilização deste método como forma de otimizar rotas, pode ser determinada por diferentes aplicações, sejam elas de soluções exatas ou heurísticas. Esta última, pode ser manipulada e construída por meio de melhorias de ciclos e circuitos, que para uma rede de grafos, priorizam os estudos de todos os nós (pontos) de uma rede a ser estudada, de forma a diminuir a distância total percorrida (LIU, 2008). Desta maneira, sua aplicabilidade está baseada na resolução de problemas com endereços pontuais, representado pelos nós, estando inserida à classe de problemas de roteirização em nós.

Desta maneira, diversos algoritmos podem ser implementados para construção de uma nova rede de roteirização em nós. Entre eles, a heurística de Clarke and Wright (CLARKE E WRIGHT, 1964), algoritmo de Christofides (CHRISTOFIDES, 1976), e por fim, problemas de otimização combinatória como técnicas de *Branch and Bond* (BEALE, 1979) e manipulação de algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975).

2.9 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO EM ARCOS

Os problemas de roteirização em arcos estão inseridos a uma vasta área de aplicação que objetiva estabelecer ciclos de trajetos de origem de serviços logísticos. A complexidade deste problema restringe que os arcos ou arestas de um grafo sejam percorridos ao menos uma vez à rede a ser roteirizada. Assim, os modelos que englobam essa abordagem não estão restritos à execução de viagens entre cidades ou entregas de mercadorias pontuais, como o caso de roteamento em nós. Sua abrangência e dimensão torna-se mais ampla, visto a aplicar de forma prática, estudos e resultados operacionais aos serviços de coleta de lixo, varrição de rua, recolhimento de neve, entre outros. Onde para estes casos, o percurso é condicionado a passar por todos os arcos (ruas) e não somente por endereços pontuais. Desta maneira, as subseções adjacentes abordarão os principais problemas de aplicação de roteamento em arcos elencados na literatura para a solução de otimização de rotas.

2.9.1 Problema do carteiro rural

O Problema do Carteiro Rural (PCR) é um Problema de Roteamento de Arcos Particulares (PRAP) que consiste em determinar um circuito de custo mínimo a ser percorrido em um grafo de modo que um determinado subconjunto de arcos (ruas) necessários sejam percorridos apenas uma vez. Referente a isto, dada uma rede não direcionada conectada $G = (V, A)$ com um conjunto de nós V e um conjunto de arcos A , constata-se para soluções do problema de roteirização que o famoso problema do carteiro chinês (PCC) pode ser utilizado para encontrar um caminho mais curto (ou de custo mínimo) (ORLOFF, 1974). Desta maneira, a utilização desta técnica delimita que o trajeto a ser percorrido deva cumprir a seguinte restrição: a rota precisa ser trilhada de modo que cada arco em A seja percorrido pelo menos uma vez. Proeminentemente a esta condição, o PCR torna-se uma extensão prática do PCC, condicionado à restrição de que apenas um subconjunto dos arcos em A devam ser atravessados a um custo mínimo.

Devido à complexidade de análise e implementação, o PCR pode ser considerado um problema de classe NP-difícil, que requer modelos de soluções de programação linear inteira. Desta forma, essa extensão acomoda mais situações de complexidades de uma rede do mundo real. Sendo muito utilizado, em particular, para problemas de extensões às roteirizações de áreas rurais ou suburbanas, onde apenas um subconjunto não direcionado das ruas precisa ser atendido.

Visto a exemplificar a aplicação do PCR para um grafo não direcionado sabe-se que, para um grafo $G = (V, A, A|R)$ onde V representa o conjunto de nós, A representa o conjunto de arcos (ruas) e $A|R$ ($\subset A$) representa o conjunto de arcos a serem transpostos. Pode-se afirmar que, para este caso em específico, o objetivo da aplicação do PCR é alçado em descrever um trajeto a ser percorrido de forma que o percurso da rota comece em um determinado nó de escolha (ponto inicial), atravesse cada arco em $A|R$ pelo menos uma vez e retorne ao ponto inicial da rede de forma a resultar em uma distância total de percurso (custo) minimizada (SHEFARAT, 2004).

De forma a tornar mais clara sua aplicação para soluções de problemas do mundo real, a utilização do método PCR proporciona resultados satisfatórios para os seguintes serviços: entregas de jornais ou correios, serviços de coleta doméstica de RSU, serviços de varrição de ruas, entre outros. Sendo aplicados principalmente a áreas rurais ou urbanas de menores dimensões. Assim, a utilização do PCR contrasta métodos heurísticos com métodos exatos (ou seja, algoritmos que produzem soluções ótimas) à medida em que são projetados a escolha do caminho mais otimizado (embora não

necessariamente o ideal). Desta maneira, estas soluções heurísticas são implementadas visto a obter resultados satisfatórios sem gastar muito tempo de execução computacional.

Entre as diversas heurísticas aplicadas ao problema de roteirização, talvez a mais conhecida para o PCR não direcionado seja a de Frederickson (1979). Esta heurística é semelhante à heurística de Christofides (1984) para o PCV, e ao contrário do PCV com aplicações de roteamento em nós, ela opera adicionando arcos artificiais (representando os caminhos mais curtos entre os nós relevantes de um grafo G ao subgrafo induzido por $A|R$, de forma a produzir uma rede conectada em um grafo Euleriano, (ou seja, uma rede em que é possível encontrar uma rota fechada atravessando cada arco (rua) exatamente uma vez).

Entre outras aplicações algorítmicas para solução do problema PCR elencados na literatura encontram-se os trabalhos de Sherafat (2004) que introduziu uma família de heurísticas de busca local para o PCR, o de Grottschel e Win (1992) com o emprego de uma heurística baseada nos princípios da manipulação de algoritmos para o problema de inspeção de rotas. E por fim, cita-se também o trabalho com algoritmos exatos propostos por Christofides et al. (1981), Corberan et al (2007), Ghiani e Laporte (2000) e Letchford (1996).

Visto a tratar de redes maiores e complexas, o algoritmo de Ghiani e Laporte (2000) foi usado para resolver instâncias com até 350 vértices (nós) para a otimização. O que parece constituir as maiores instâncias abordadas anteriormente por um método exato ou heurístico na literatura para a resolução de uma roteirização em arcos de um grafo não direcionado.

Assim, as heurísticas aplicadas a estes projetos são baseadas em uma estrutura de pesquisa local que também podem ser usadas para otimizar rotas em outros tipos de problemas de roteamento de arco (por exemplo, o Problema de Roteamento de Arco Capacitado). E, de acordo com os modelos científicos, parecem consistir na melhor abordagem de custo benefício resultado x tempo de processamento atualmente disponibilizadas para a solução PCR.

2.9.2 Problema do carteiro chinês

O problema a ser solucionado através deste método busca determinar a cobertura de todas as ruas (arcos) atribuídas de uma rede e retornar ao ponto de partida na distância mais curta, ou seja, no caminho mínimo. Assim, ao se construir uma rede $G = (V, E)$ em que cada arco representa uma rua e onde cada nó representa uma interseção viária, este problema então, é construído visando encontrar um ciclo a partir do grafo G que viaje cada borda pelo menos uma vez na distância total mínima. Entretanto, em contraste com o problema do carteiro rural, o PCC é usualmente aplicado às configurações morfológicas urbanas de maiores dimensões.

O problema do carteiro chinês (PCC) é um problema relacionado ao comportamento de grafos Eulerianos. Sendo um dos principais problemas para soluções de rotas que abordam resoluções a partir de roteamento em arcos. A sua complexidade aborda aplicações a diferentes tipos de rede, entre elas, trabalhabilidade em grafos direcionados, não-direcionados e por fim, mistos, que se enquadram a aplicações NP-difícil (BARAHONA, 1990). Porém, para a execução deste projeto em específico, constata-se a aplicação de uma rede viária não direcionada. Assim, a restrição para este caso está condicionada à afirmação de que um grafo G não direcionado deve apresentar grau par em todos os nós de análise em G , onde torna-se necessário a duplicação de alguns arcos incidentes aos nós, visto a balancear a rede de forma que todos os graus pertencentes a G , sejam pares (SHERAFAT, 2004).

Entre as diversas soluções de aplicações algorítmicas para o PCC, Eiselt et al. (1995) apresenta um algoritmo polinomial eficiente para o PCC composto por duas fases. A primeira fase determina um conjunto de arcos de custo mínimo que precisa ser duplicado para que o grafo se torne Euleriano (ou seja, todos os nós tendo grau par). E a segunda fase é processada com o objetivo de construir uma projeção neste grafo, visitando cada arco apenas uma vez. A fim de conhecimento, Christofides (1975) descreveu um eficiente algoritmo polinomial para a primeira fase, resolvendo um problema de correspondência de custo mínimo.

2.9.2.1 Problema do carteiro chinês com custos dependentes de carga

O problema do carteiro chinês com custos dependentes de carga, Chinese Postman Problem with load-dependent costs (CPP-LC), é uma interessante variante do conhecido Problema do Carteiro Chinês (PCC) e pode ser definido da seguinte forma: Seja $G = (V, A)$ um grafo conectado não

direcionado, em que $V = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós e $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ é o conjunto de arcos, onde o nó 1 representa o ponto inicial (depósito) e cada arco $a \in A$ tem um comprimento de ≥ 0 e uma demanda de $q(a) \geq 0$ unidades de mercadorias para ser distribuídas ou recolhidas na borda a . Então, satisfazendo a estas condições, um veículo com peso bruto W e carregado com $(Q = \sum P \in E^{q_e})$ unidades de mercadoria (q_e), começará seu percurso no depósito e atravessará todas as bordas do grafo de forma a atender todas as demandas propostas. Seu ciclo se encerra com o retorno ao depósito que é o ponto inicial (PILLAC et al, 2016, CORBERÁN et al 2018).

De forma descritiva, Corberán et al (2018) relata que a sua funcionalidade é aplicada de acordo com o seguinte método: A primeira vez que um arco $e = (i, j)$ é percorrido, uma quantidade “ q_e ” da mercadoria é descartada ou acoplada ao veículo. Isto dependerá se o serviço logístico é condicionado a executar tarefas de logística comum ou reversa. Por fim, depois de executado, uma borda “ e ” pode ser percorrida mais de uma vez. Visto que cada vez que o veículo atravessa uma borda ou arco “ e ” (seja recolhendo/distribuindo mercadoria ou não) ocorre ao processo do ciclo um custo proporcional ao comprimento do arco, multiplicado pelo peso atual do veículo (Equação 4):

$$d_e \times (W + \text{“carga do veículo durante o percurso”}) \quad (4)$$

Enquanto d_e e W são constantes, a “carga do veículo durante o percurso” é uma variável que depende da quantidade de mercadoria recolhida ou distribuída nos arcos contemplados antes de e , e também no próprio arco e . Desta forma, seja Q_e a carga do veículo no nó i imediatamente antes de percorrer o arco $e = (i, j)$, constata-se então, que o custo de percorrer e é de $(W + Q_e)$, enquanto o custo de percorrer e no processo de execução é de $(W + Q_e - q_{e/2})$, isto porque a carga do veículo ao atingir o nó j é $(Q_e - q_e)$, de forma a assumir que a carga média do veículo enquanto em processo de deslocamento no arco A é $(Q_e - q_{e/2})$.

Desta forma, a aplicação CPP-LC também pode ser definida como um problema de carregamento inserido à logística reversa, onde um veículo vazio sai do depósito e carrega unidades q_e de mercadoria na primeira vez que cada arco A é percorrido. Assim, existem algumas diferenças significativas entre o CPP-LC e o clássico PCC, a saber: os trajetos aplicados ao CPP-LC não podem ser expressos simplesmente como um grafo Euleriano (aumentado), mas como uma sequência de

nós e arcos. E para o CPP-LC, um arco pode ser percorrido mais de duas vezes (inoperante mais de uma vez) em um trajeto de otimização.

Por fim, a execução e o manuseio deste método, pode ser inserido nas subáreas de interesse no estudo de problemas de roteamento de veículos que incorporam as emissões de GEE em sua função objetivo. As contribuições iniciais de trabalhos da sociedade científica incluem estudos de McKinnon (2007) e de Sbihi e Eglese (2007). Sendo que os modelos mais recentes estão enraizados no trabalho de Fagerholt et al. (2010), Norstad et al. (2011) e Hvattum et al. (2013) que propõe técnicas que aplicam velocidade a problemas de otimização no contexto da rota de navio, a fim de reduzir o consumo de combustível. Neste contexto o artigo de Bektas e Laporte (2011) aborda sobre o “Problema de Roteamento aplicado à Poluição”, que aplica o mesmo método para o problema de redução de combustível em navios, porém aplicados ao contexto de roteamento de veículos. Proeminente a isto, esses estudos foram processados e programados por várias modelagens heurísticas e contribuições de algoritmos aproximativos elencados por Demir et al. (2012) e Franceschetthi et al (2017).

Já o modelo de consumo de combustível mais comum usado neste contexto é baseado no trabalho de Barth et al. (2005) e Barth e Lima et al (2011), juntamente com o modelo aplicado por Ross (1994). Desta forma, a modelagem torna-se bastante complexa, uma vez que compreende três módulos, a saber: a potência do motor, a velocidade do motor, e a taxa de combustível. Sendo que as três principais variáveis correlacionadas ao consumo de combustível são: a distância percorrida, o peso do veículo (incluindo o peso em ordem de marcha e a carga transportada/tara) e a velocidade aplicada pelo motorista condutor. Onde, quando a velocidade é constante, o consumo de combustível pode ser aproximado por $A \times \text{distância} \times \text{peso do veículo}$, sendo A uma constante (KARA et al 2007).

De maneira aprofundada vários fatores menos importantes, como características geométricas e altimétricas da estrada, aceleração e desaceleração do veículo, uso de ar condicionado e estilo de direção do motorista também entram em análises de estudos, pois suas variáveis alteram consequentemente os resultados de consumo de combustível de um veículo de carga. Entretanto, as avaliações destes fatores secundários tornam-se bastante difíceis de mensurar.

2.9.3 Problema de roteirização em arcos com limite de capacidade

O problema de roteirização em arcos com limite de capacidade é definido em um grafo não direcionado (V, A) . Onde cada arco $(i, j) \in A$ tem um custo $c_{ij} \geq 0$ e uma demanda $d_{ij} \geq 0$ associada a rede. Assim, se um arco (i, j) tem a demanda positiva $d_{ij} > 0$, então, ela é chamada de arco ou aresta necessária. De forma descritiva, $ER \subseteq E$ é o conjunto de arcos necessários na rede. Exemplificando, para o caso de uma frota disponível de veículos M , onde cada veículo apresenta uma capacidade operacional D de demanda, inicia-se seu percurso a partir de um nó especial (v_0) denominado como depósito (ponto inicial). Desta maneira, ao percorrer o grafo, o veículo pode (i) atender a uma borda, que deduz sua capacidade por d_{ij} e conseqüentemente aumenta o custo da solução por c_{ij} . Assim, a rota de um veículo é definida por um ciclo que começa e termina no depósito (v_0) , onde seu percurso se estende ao menos uma vez à visita de todos os arcos do grafo (G) (SILVA, 2020).

A literatura contém inúmeras aplicações do problema de roteirização em arcos com limite de capacidade no mundo real, por exemplo: coleta de lixo, varredura de ruas, remoção de neve, etc. Por fim, a aplicabilidade deste método abrange a utilização de metaheurísticas que entre suas diversas funções podem empregar processos heurísticos, de busca local, de otimização estocástica e de métodos evolutivos baseados no comportamento da população. O objetivo final torna-se obter uma boa relação entre a qualidade das soluções propostas e o esforço de desempenho computacional para encontrar as soluções.

A natureza desta complexidade é enquadrada ao problema NP-difícil para o qual muitas metodologias exatas e heurísticas foram propostas (EISELT et al, 1995a; EISELT et al 1995b). As soluções ótimas existentes aos modelos científicos relatados contemplam apenas redes relativamente de pequenas instâncias que envolvem no máximo cerca de 100 arcos com demanda positiva (ARAKAKI E USBERTI, 2019). Já os melhores resultados para redes com instâncias maiores são fornecidos e resolvidos a partir da aplicação de métodos heurísticos, que apresentam resultados aproximados de soluções ótimas (KAUFMANN, 1967).

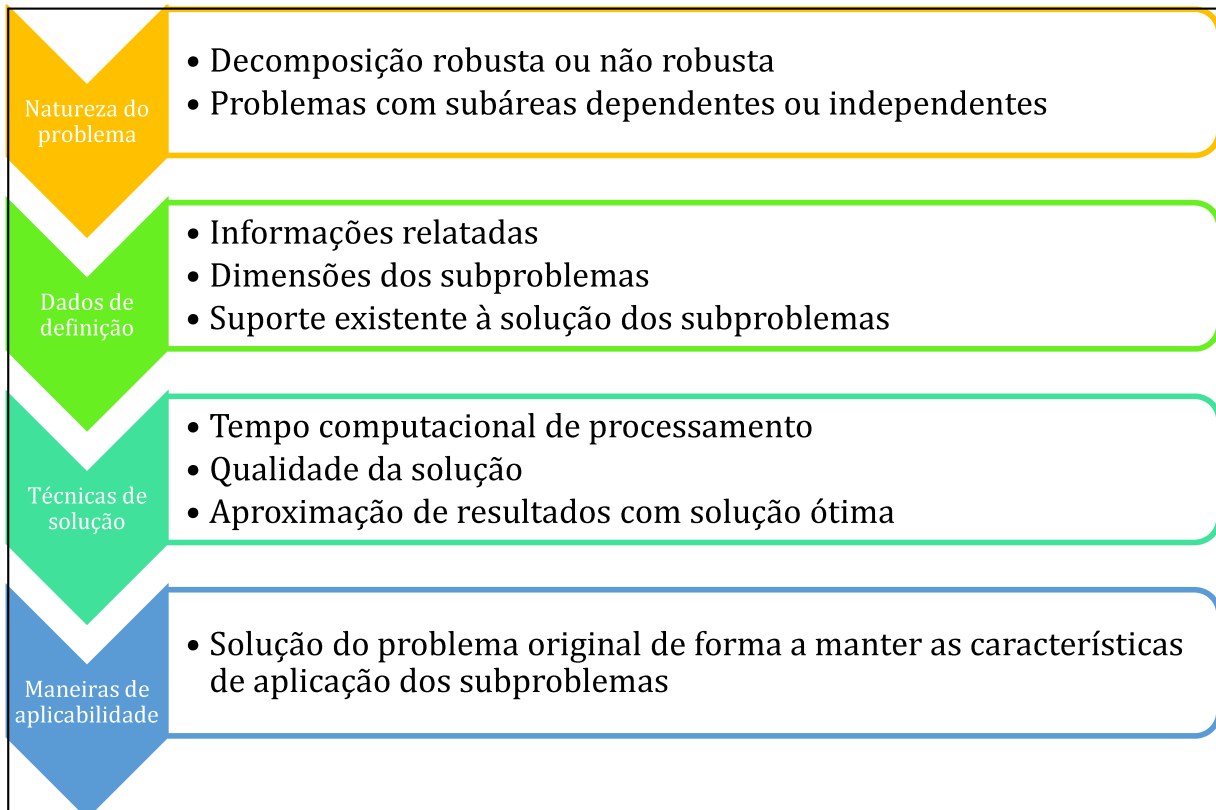
2.10 SOLUÇÕES HEURÍSTICAS APLICADAS À ROTEIRIZAÇÃO

Nos últimos anos, vários algoritmos de decomposição de programação matemática foram propostos para a solução de roteirização. Isto porque para a definição exata de resolução dos problemas existem diversas metodologias que variam de uma configuração para outra. Desta forma, torna-se necessário desenvolver soluções heurísticas que são suficientemente flexíveis e customizadas para lidar com uma variedade de objetivos e restrições que satisfaçam as condições dos mais específicos objetivos propostos. Assim, estas soluções tornam-se técnicas que apresentam resultados satisfatórios aplicados a uma relação que compara a manipulação de dados com o tempo de modelagem computacional.

2.10.1 Estratégias de decomposição de soluções heurísticas aplicadas a roteirização

No domínio de soluções heurísticas, as técnicas de decomposição têm se mostrado cada vez mais proeminentes nos estudos de resolução de grandes redes de grafos (GROER et al. 2010; VIDAL et al. 2014; UCHOA et al. 2017). Assim, as estratégias de decomposição são amplamente utilizadas na prática de modelos reais, pois geralmente sua utilização constroem planos de roteirização mais estruturados e intuitivos. Suas características derivam do princípio de dividir e conquistar. Elas consistem em definir um ou vários subproblemas de forma que sua solução contribua para a solução de um problema com escala de complexidade maior, seja produzindo uma nova solução, seja melhorando uma já existente, ou por fim, identificando uma solução promissora do espaço de busca. Com esta visão em mente, as técnicas de decomposição heurística podem ser caracterizadas em relação aos dados de origem do problema a ser resolvido (Figura 9).

Figura 9– Processo das técnicas de decomposição para escolha das soluções heurísticas.



Fonte: Autor (2022)

De forma descritiva, os métodos de decomposição baseados em rotas criam um conjunto de subproblemas independentes $S = \{S_1, \dots, S_k\}$, onde cada subproblema é resolvido visto a reconstruir uma solução para o problema original. Esta solução é processada de forma a correlacionar as soluções para os subproblemas por meio de uma pesquisa de genética híbrida (VIDAL et al, 2013). Cada subproblema é definido por um par $S_j = (V_j, P_j)$ onde V_j é um subconjunto de arcos ou nós a serem percorridos e P_j é o número de veículos atribuídos ao subproblema j . Acrescido a isto, as coordenadas geográficas (x_v, y_v) de cada localização precisam ser conhecidas ($v \in V$). Por fim, em um método de decomposição baseado em rotas, o conjunto de vértices (nós) V_j de cada subproblema S_j é construído a partir de um subconjunto de rotas em uma determinada solução R . Este subconjunto é indexado por $I_j \subseteq \{1, \dots, p\}$.

Assim, Sörensen et al (2019) descreve que os métodos de decomposição baseados em roteirização se mostraram proeminentemente superiores para soluções baseadas na busca de um caminho

mínimo. Principalmente tangente a variáveis de desempenho de redução de custo. Entretanto, a literatura atual carece de uma caracterização das estratégias de decomposição e uma investigação sistemática de seu impacto quando integrado em heurísticas de última geração (SANTINI, 2019).

2.11 MATRIZ DE TRANSPORTES

Após o conhecimento de aplicação de todo o processo de roteirização de uma rede de transporte de modal rodoviário listados no decorrer deste trabalho, este capítulo é inserido e formulado com a funcionalidade de justificar o motivo pelo qual foi escolhido a otimização deste modal de transportes entre os demais existentes e elencados na literatura. Uma vez que segundo Peixoto (2012), cidades como Barcelona e países como Alemanha dentre outros países na Escandinávia têm investido na coleta de lixo subterrânea e à vácuo. Entretanto, pelo espaço de abrangência cobrir áreas apenas brasileiras, ao decorrer desta seção serão discutidos números que geram embasamentos para a otimização de resultados atrelados ao transporte realizado por malhas viárias.

Como um processo de otimização não deve ser tratado isoladamente. Sabe-se que juntamente com as técnicas, as definições e as modelagens descritas ao longo de todos estes capítulos, outras variáveis necessitam ser exploradas. Assim, conceitos de distância, declividade, poluição foram correlacionados à otimização de uma rota. Por conseguinte, esta seção irá descrever definições e aplicações relacionadas à condutibilidade de um veículo. Ou seja, aspectos de velocidade, tempo, aceleração e controle de rotações por minuto (RPM) que um motor pode atingir para o deslocamento de um veículo. Sendo estas variáveis, associadas ao conceito de *ecodriving*, tido como um modo sustentável de condução veicular.

2.11.1 Transporte Rodoviário e o consumo de combustível

Segundo o Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPEAD, sabe-se que no Brasil, local onde é realizada esta pesquisa, o modal rodoviário representa aproximadamente 61% do transporte total de cargas. Este número é justificado principalmente pelos resultados que relacionam a rapidez de implantação em conjunto ao baixo custo de sua implementação (CAPEX). Entretanto, é necessário destacar que mesmo sendo o mais utilizado, não significa que seja o mais funcional. Assim, é de ciência ao leitor que este modal,

possui o maior custo operacional (OPEX), visto que é um modal energeticamente pouco eficiente quando relacionado a conceitos sustentáveis (ONU, 2017). Esta ineficiência está associada a altas taxa de manutenção veicular juntamente com altos dados de poluição (LAI et al, 2021).

Na logística, área de concentração deste estudo, o transporte rodoviário pode ser considerado como uma das áreas mais importantes de abastecimento e retorno de materiais e bens de consumo. Desta maneira, estima-se que os custos com transporte podem atingir cerca de 60% dos custos logísticos, correspondendo em média 20% do custo total das empresas (IEA, 2020). Assim, relacionado à expressividade destes números, técnicas de *ecodriving*, podem ser utilizadas visando estabelecer uma menor produção de esforços mecânicos e conseqüentemente uma redução do consumo de combustível. Esta técnica, são ações sustentáveis a serem executadas pelo condutor do veículo, de forma a estabelecer zonas ideais de aceleração e desaceleração, trocas de marcha e por fim, a manutenção de velocidade para realização do deslocamento.

Baseado nestes números de custos operacionais, alguns fatores afetam o consumo de combustível nos transportes, necessitando assim serem descritos. Um deles é a demanda do serviço de transporte, que matematicamente está relacionada à quantidade em toneladas que uma carga necessita ser transportada ou recolhida, em função da distância em quilômetros a ser percorrida para a execução de qualquer atividade. Outro fator, é a negligência de manutenção preventiva de aspectos infra estruturais que abordam a qualidade das vias, e de aspectos mecânicos, que abordam temáticas de renovação da frota circulante. Estes fatores estabelecem uma relação diretamente proporcional ao desempenho energético, uma vez que o consumo de combustível e a emissão de GEE são maiores em malhas rodoviárias sem planejamento e em frotas mais antigas em circulação (CETESB, 2016).

2.11.2 Desempenho Energético

O desempenho energético de um veículo motorizado é dado pela seguinte função, que correlaciona a maior distância (Km) a ser percorrida, a partir do consumo de um litro de combustível para o seu deslocamento (km/l). Sabe-se que a otimização deste desempenho, pode estar associado a diversas causas externas e internas ao veículo. Entretanto, três classes podem ser classificadas como diretamente proporcionais à efetividade energética para o deslocamento. São elas, as classes mecânicas, que englobam todo controle técnico e operacional do veículo (motor, aerodinâmica,

ignição, cilindradas, combustão interna, etc.); a classe viária, que diz respeito a qualidade da via, do revestimento, planejamento de greide; e por fim, a classe de condutibilidade do veículo, inserida à velocidade operacional baixa, às taxas de aceleração e desaceleração e ao tempo aplicado para o deslocamento (BRASIL, 2013; CETESB, 2021). A Tabela 6, traz a representação estimada de economia de combustível a partir das variáveis citadas neste parágrafo.

Tabela 6 – Intervenções para o controle e redução do consumo de combustível

Pesquisas Acadêmicas	Variável condicionante	Economia estimada
Ayyildz et al (2017)	Ecodriving	5%
Huang et al (2019)	Ecodriving Condições viárias Configurações mecânicas	23-49%
Silva (2007)	Ecodriving Pneus Aerodinâmica	11,4%
Word bank China (2011)	Ecodriving Pneus Aerodinâmica Carga/Tara	23,7%
Carballeira et al (2019)	Telemetria	9,5-31,5%

Fonte: Autor (2022)

Como descritos na tabela e no parágrafo acima, dentro destas classes, alguns fatores apresentam causas principais do consumo excessivo de combustível. O primeiro deles são os fatores oriundos de ações humanas, que está inserido à maneira que o condutor manipula o veículo. Assim, um planejamento operacional de condutibilidade eficiente (*ecodriving*) torna-se uma variável que provoca mudanças de resultados quanto a ineficiência energética de um veículo ou trajeto. Desta maneira, torna-se necessário, a manipulação de dados para o planejamento e a correlação de três elementos fortemente influente à condutibilidade. São eles, a velocidade (inseridas à aceleração e desaceleração), o greide viário e o tempo (LAI et al, 2021).

Segundo Huang et al (2019), estes elementos apresentam otimizações inversamente proporcionais, uma vez que a velocidade ideal para a redução de combustível deve estar entre zonas mais baixas (40-80 km/h) a depender da via de deslocamento, visto que, terá um menor esforço mecânico e uma menor relação com a influência do ar. Entretanto, esta condição é funcional a partir de greides planos. Quando o cenário de estudo apresenta maiores oscilações de greide, uma velocidade maior

deve ser aplicada, justificada pela influência da gravidade para um veículo de carga. Por fim, o tempo necessita ser planejado com a determinação ideal da velocidade, uma vez que, um veículo gasta por hora aproximadamente 0,7-1 litro de combustível apenas por estar ligado (CETESB, 2016; IEA, 2020).

Proeminentemente a estes dados, um plano de ação necessita ser executado a partir de um triângulo de restrições que irá apontar o ponto da curva mais baixo quanto ao custo operacional em função do tempo e da velocidade aplicada. É importante destacar que a velocidade ideal necessita ser calculada separadamente, pois subseções de greide expressam correlação ao resultado definido como ideal (LAI et al, 2021).

Assim, um planejamento inteligente de custo operacional deve correlacionar o comportamento destas variáveis, de forma a encontrar a situação ideal para o projeto e área de estudo. É importante destacar que a determinação do ponto ideal da curva do custo de operação em função da velocidade, greide e tempo para uma roteirização deve ser específica. Uma vez que cada área de estudo irá apresentar limites de velocidade viárias, inclinações de greide e trânsito típico diferentes.

2.12 PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (AHP)

Os problemas que envolvem gerenciamento e operacionalização de processos, por muitas vezes, podem ser considerados complexos, principalmente quando atrelados à manipulação e ao processamento de inúmeras variáveis adotadas. Assim, de forma sucinta e na maioria dos casos, isto significa que as técnicas a eles aplicadas podem ser frequentemente descritas e definidas de uma forma muito generalizada. Entretanto, para a redução desta complexidade exige-se um conhecimento multidisciplinar que deve estar apoiado ao desenvolvimento de habilidades analíticas apoiadas pela metodologia certa. Um conceito que auxilia na análise da complexidade dos problemas de gerenciamento e operacionalização de origem multidisciplinar é a utilização de AHP.

2.11.1 Processo de execução AHP

O método AHP é uma das sugestões de soluções que diz respeito à construção e aplicação de sistemas de avaliação multicritério, que por meio de pesos valorados das variáveis do projeto, soluciona os dados mais incisivos para a sua execução (CRAWFORD E WILLIAMS, 1985). Ele se originou na década de 1970 nos Estados Unidos. Sendo que, nas últimas três décadas, tem sido objeto de muitas pesquisas metodológicas multidisciplinares onde aplica-se sua utilização com sucesso para a solução e decisão de muitos problemas.

Saaty (1987), descreve que o AHP pode ser definido como um processo de hierarquização de um sistema a fim de realizar uma ampla avaliação e seleção final de uma das soluções “alternativas” para um problema particular. O método também pode ser compreendido de forma mais ampla como uma teoria de valoração de dados, utilizando para sua avaliação bases quantitativas e/ou qualitativas. Assim, o trabalho de resolução de um problema utilizando o AHP compreende duas fases (SAATY, 2001).

Na primeira fase, é preparada a estrutura hierárquica do sistema de gestão e operacionalização. Em suma, o objetivo deste estágio tem a função de identificar os elementos do sistema a ser trabalhado, de forma a agrupar as variáveis do processo de acordo com uma hierarquia de pesos e prioridade. Portanto, todas as variáveis e/ou elementos localizados em um nível hierárquico superior atuarão sobre os elementos situados em um nível inferior. De forma exemplar, esta atividade é semelhante à construção de uma árvore de metas.

Já na segunda fase, os elementos individuais são avaliados e a consistência e a constância das variáveis e dos dados de avaliação são verificadas. A avaliação funciona comparando todos os pares de elementos em um determinado nível do ponto de vista de cada elemento localizado em um nível superior à estrutura hierárquica previamente construída. Por fim, o resultado das comparações é um conjunto de matrizes que, após a normalização de valoração dos dados e da verificação da equação de consistência, formam a base para a avaliação e classificação final do sistema (SAATY, 1987).

Referente a isto, todo sistema pode ser considerado como um conjunto de elementos que se relacionam mutuamente. Esses elementos formam uma hierarquia particular, que é crucial para a existência e sobrevivência de muitos sistemas, sejam eles de escala naturais ou executados e modificados pelo homem. Desta maneira, um sistema torna-se um arranjo de multicamadas, onde

os níveis são diferenciados pela estrutura interna com a manipulação de suas respectivas funções. Neste sentido, as funções dos elementos localizadas em uma parte de nível inferior estão subordinadas às funções dos elementos de um nível superior. Onde o funcionamento e a operacionalização adequada dos níveis superiores dependem diretamente do funcionamento adequado dos níveis inferiores (CABALA, 2010).

Em termos mais amplos, o método AHP pode ser subdividido em dois tipos de hierarquia: a estrutural e a funcional (SAATY, 1980). A hierarquia estrutural por definição, indica as relações entre as partes componentes dos sistemas considerados complexos, onde a relação de dados e variáveis necessitam ser entendidas como um arranjo desenvolvido e construído à terminologia de propriedades estruturais (por exemplo, forma, volume, comprimento, cor, idade). Assim, a hierarquia estrutural reflete a maneira como a mente humana analisa a complexidade de gerenciamento, distinguindo a relevância de classes, grupos, subgrupos, conjuntos e subconjuntos (BERNASCONI ET AL, 2010).

A hierarquia funcional, por outro lado, aparece nas relações entre os elementos de um determinado nível hierárquico. Onde, estes mesmos elementos não são, portanto, completamente equivalentes. De forma prática, a aplicação da hierarquia funcional significa que as variáveis de avaliação receberão as seguintes coordenadas: “menos importante”, “mais importante”. Na criação de estruturas hierárquicas destinadas a refletir problemas práticos de situações específicas, é preciso lembrar que a percepção humana se torna limitada. Por isso a literatura exige que o número de elementos em um determinado nível hierárquico, bem como o número de níveis hierárquicos próprios das camadas para um determinado problema de pesquisa, não deve exceder nove. Para aplicações no AHP, um maior número de fatos significa que eles não são capazes de fazer uma avaliação confiável (CABALA, 2010).

Desta forma, as preferências no AHP são determinadas com base em comparações de pares, visto envolver a avaliação de cada elemento com todos os outros elementos em um determinado nível hierárquico. Assim, um elemento é um objeto definido como uma variante de decisão ou um critério de avaliação. Sendo que, o ponto de referência para as comparações do elemento seja o nível mais alto e fortemente influente à hierarquia da matriz A_{ij} . Por conseguinte, as variáveis ponderadas à matriz (A_{ij}) necessitam atender algumas das restrições e condições matemáticas para obtenção de

resultados satisfatórios à sua aplicação de avaliação. Estas condições estão descritas nas Equações 5, 6 e 7.

$$[ij] \text{ onde } i, j = \{1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

$$[ij] = 1 \text{ para } i = j \quad (6)$$

$$[ij] = \frac{1}{a_{ji}} \text{ para } i \neq j \quad (7)$$

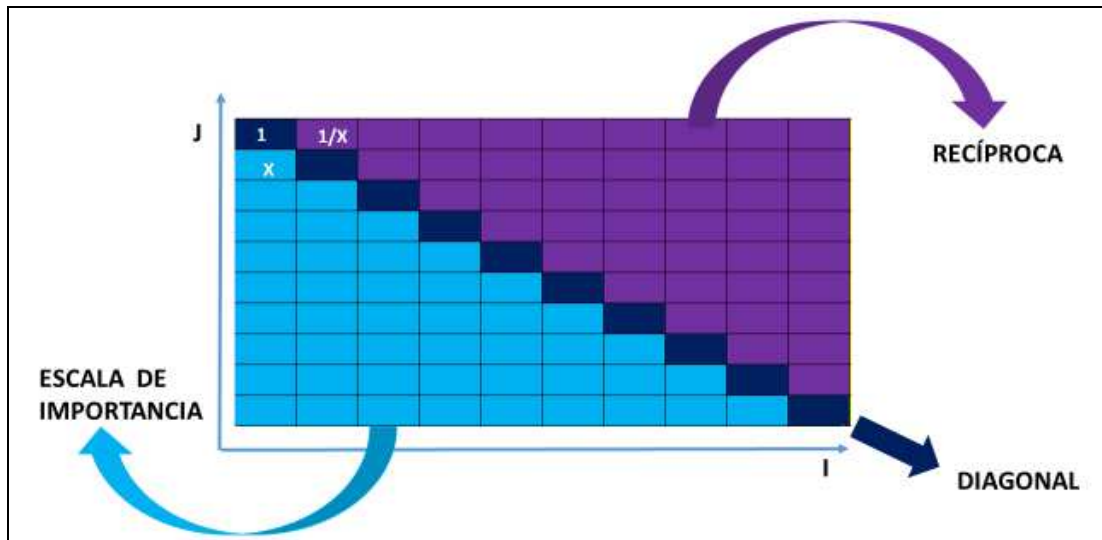
Assim, de acordo com Saaty (1987), a matriz de preferência com as equações descritas acima torna-se o resultado de uma comparação entre os pares de todos os elementos em um determinado nível hierárquico com respeito a um recurso definido (atributo, critério). A equação (5) significa que suas restrições lidam com uma matriz de dimensões $n \times n$, onde n é o número de elementos comparados. Já a equação (6) é formulada a partir do princípio de identidade, o qual afirma que dois elementos idênticos comparados entre si não são diferenciados por preferência. Onde, a falta de diferença em preferência é expressa pelo número 1. Desta maneira, todos os valores dos elementos ao longo da diagonal da matriz deverão ser iguais a 1.

Portanto, para comparações entre os elementos de um determinado nível hierárquico, atribui-se o princípio de que um elemento na linha i é sempre comparado com um elemento na coluna j . Assim, A_{ij} indica a escala de grandeza (mais ou menos) importante referente ao conceito de relevância do elemento (i) em comparação ao elemento (j). Por fim, no AHP as preferências são recíprocas, o que é expresso pela equação (7). De forma didática, para a condição ($A_{ij} = x$), ao afirmar que valor do elemento (i) seja, por exemplo, (x) vezes mais importante do que o elemento (j), então atribui-se automaticamente que o valor de (j) ao ser inserido à matriz A_{ij} , deverá ser de $\frac{1}{x}$, com base na categorização de importância comparativa entre os elementos (SAATY, 1980).

Na comparação de pares de (n) elementos, faz-se necessário que os valores de comparação sejam inseridos acima da diagonal da matriz (A). Assim, os valores restantes da diagonal principal, deverão sempre ser iguais a 1. As demais lacunas da matriz (A) deverão ser preenchidas com os valores de relevância que varia de 0 a 9, sendo que os valores recíprocos de retorno deverão se

concentrar sempre acima da diagonal principal (Figura 10). Portanto, o número total de comparações necessárias é igual a $\frac{n(n-1)}{2}$.

Figura 10– Exemplo do processo de construção da matriz AHP.



Fonte: Autor (2022)

Quanto às etapas de comparação das variáveis do projeto, uma escala de avaliação adequada necessita ser introduzida. Esta escala tem a função de estimar e valorar os conjuntos de elementos combinados de cada camada. Assim, no AHP, presume-se que a escala de notas deva variar de 1 a 9, onde o elemento *i* é igual ou mais importante do que o elemento *j*, e que a escala descrita seja a recíproca desta escala (1/2, 1/3, ... 1/9) quando o elemento *i* é menos importante do que o elemento *j*. Durante as comparações, sugere-se que os números ímpares de 1 a 9 são usados (SAATY, 1987, 2001). Se houver dúvidas na configuração das preferências, use números pares. Uma interpretação detalhada da escala de avaliação é fornecida na Tabela 7.

Tabela 7 – Escala de avaliação usada em comparações de pares.

Intensidade da importância	Definição	Conceito
1	Igualmente importante	Duas atividades contribuem igualmente ao objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um elemento

5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um elemento
7	Muito fortemente mais importante	Elemento fortemente favorecido em relação ao outro
9	Extremamente mais importante	Elemento fortemente favorecido à classe mais alta de importância
2,4,6,8	Valores intermediários à escala	Escalas utilizadas para interpolar os elementos caso esteja entre os intervalos das linhas citadas acima

Fonte: Adaptado Saaty (2001)

Em situações práticas, deve-se combinar os elementos expressos do projeto por meio de diferentes características. Essas comparações tornam-se possíveis quando são realizadas em relação a um ponto de referência específico, ou seja, outras variáveis do projeto. Assim este ponto de referência é um objeto superior na estrutura hierárquica do problema de pesquisa. Desta maneira, usando a escala acima, uma matriz recíproca ($A_{[ij]}$) é criada onde A é a avaliação do especialista que expressa a preferência do elemento (i) em relação ao elemento (j). A resposta à pergunta de quão mais importante um elemento é do que os outros é dada simplesmente pela combinação das medidas de todos os elementos.

2.11.2 Verificação de consistência da matriz AHP

A matriz de comparação de pares é consistente (matriz de consistência) quando a seguinte igualdade é verdadeira: para cada i, j e k: $[A_{ik}, A_{kj}] = A_{ij}$. Referente a esta condição, esta fórmula expressa a transitividade das preferências da matriz A. Assim, a matriz de comparação de pares para medições precisas de qualquer número de elementos é uma matriz de consistência (BERNASCONI et al, 2010).

Uma vez realizadas as comparações das variáveis par a par, a próxima etapa torna-se verificar se os julgamentos utilizados para a valoração desta foram consistentes. Desta forma, o AHP calcula uma razão de consistência (RC) a partir da comparação entre o índice de consistência (IC) da matriz executada com o índice de consistência de uma matriz do tipo aleatória (SAATY, 2012). Os valores padrões estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Índices de consistência aleatória e de corte.

Tamanho da matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5
IC médio	0	0	2	9	1	5	5	0	5	0

Fonte: Saaty (2001)

O índice de consistência (IC) refere-se à média das demais soluções da equação característica para uma matriz inconsistente A. Este índice aumenta sua proporção a partir da inconsistência das estimativas. Usando a escala de comparação sugerida (1/9, 1/8, ... 1/2, 1, 2, 3... 9) os valores para as comparações de pares são gerados aleatoriamente. Posteriormente, é calculado a razão de consistência (RC) através da equação (8).

$$RC = \frac{IC(\text{projeto})}{IC(\text{médio})} = \frac{\lambda(\text{max}) - n}{r(n-1)} \cdot 100\% \quad (8)$$

Finalmente, as estimativas e a consistência da matriz executada são consideradas aceitáveis se o CR for inferior a 10%. A fim de conhecimento, na literatura existem outras formas de verificação menos usuais para analisar matrizes proporcionais que não se aplicam a este projeto. Estes, baseados na execução e manipulação de médias geométricas (CRAWFORD e WILLIAMS, 1985).

3 ÁREA DE ESTUDO

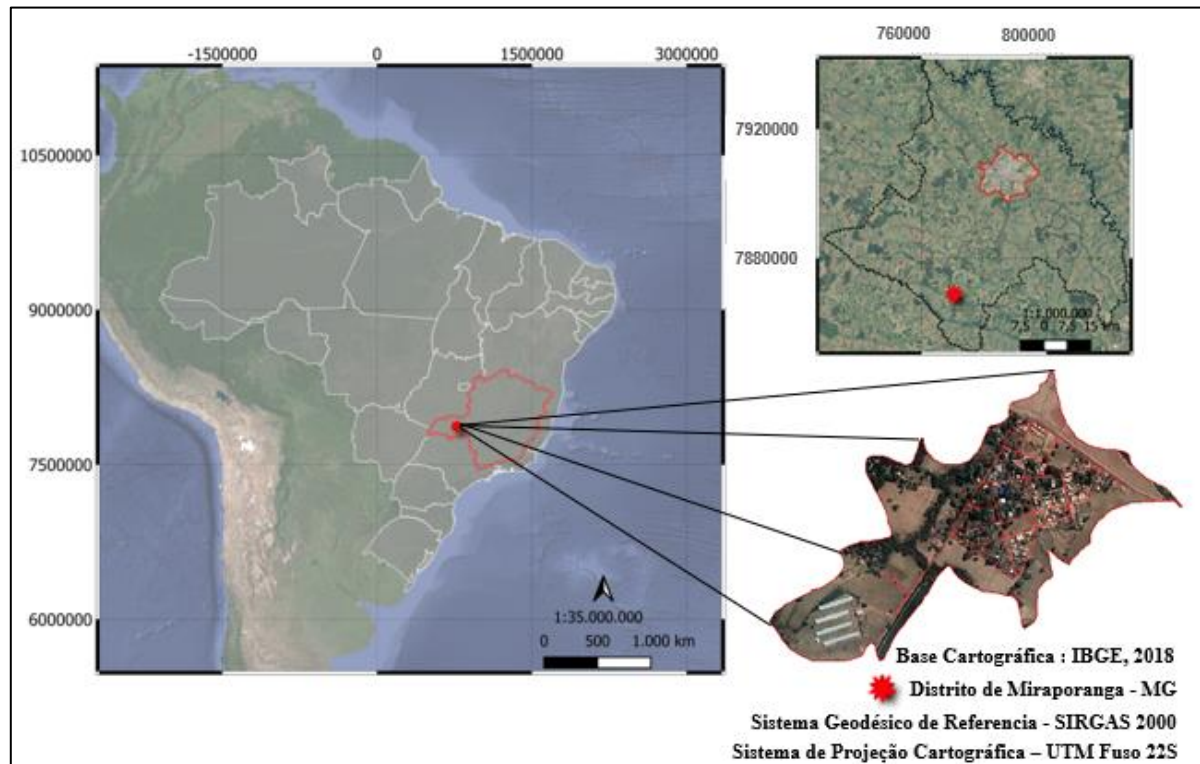
Este capítulo é destinado a caracterizar descritiva e graficamente a área de estudo do projeto. Assim, toda a seção contém dados de detalhamento topográficos, geográficos, censitários e possibilidades existentes de malhas rodoviárias para a cidade e o distrito escolhidos como área piloto de estudo.

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área de estudo é contemplada pelo distrito de Miraporanga, localizado no município de Uberlândia/MG, pertencente à Mesorregião Geográfica do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. O município está posicionado a uma latitude de 18°55'23''S e longitude 48°17'19''O. Desta maneira, a Figura 11 exibe o mapa de localização do objeto de estudo. O primeiro mapa (esquerda) representa

contornos característicos de limite nacional e estadual. Os demais mapeamentos ilustram graficamente a posição geográfica do distrito, que fica localizado dentro do perímetro municipal de Uberlândia, e há aproximadamente 50 km da mancha urbana do mesmo (representado pelo contorno vermelho do mapa a direita).

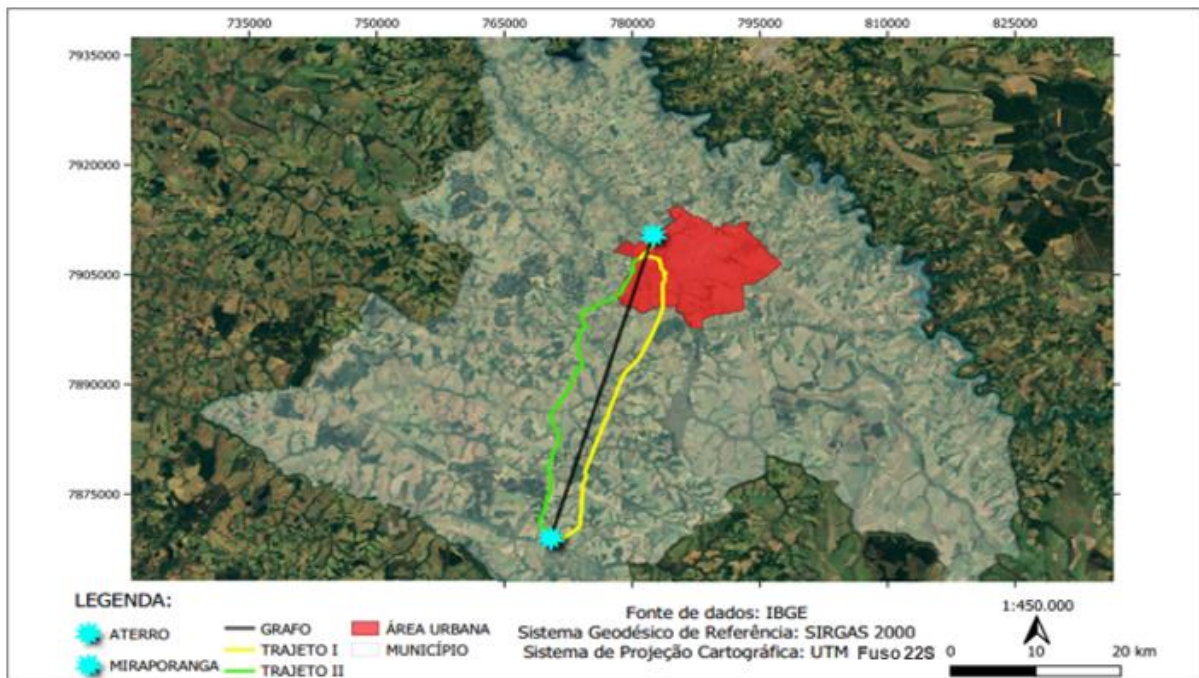
Figura 11- Localização da área de estudo.



Fonte: Autor (2022)

Referente às caracterizações de dispersão urbana entre a base de instalação do aterro sanitário (que contempla a mesma localização geográfica da garagem dos veículos coletores de RSU) e o distrito de Miraporanga, constata-se por meio de aplicativos baseados na navegação por GPS, a possibilidade de acesso distrital por meio de dois trajetos (Figura 12). Suas respectivas distâncias são 49 km (Trajeto II) e 49.6 km (Trajeto I), respectivamente.

Figura 12– Representação gráfica de trajetos entre o ponto inicial/final e o ponto de coleta.



Fonte: Autor (2022)

Conforme a representação gráfica ilustrada acima, os traços que constituem os Trajetos (I e II) são extensões e bifurcações constituintes de rodovias federais para o acesso distrital. São elas, a BR-497 (Trajeto II) e a BR-455 (Trajeto I). Desta maneira, os parâmetros sintáticos que constituem a inclinação de greide (declividade) e a distância de seus trajetos, foram demarcados e descritos ao longo da malha viária, visto a estabelecer a caracterização geográfica e geométrica de cada caminho percorrido. Concomitante a estes dados, o grafo demarcado no mapa, tem a função de mostrar em linha reta, a projeção de dispersão geográfica entre os dois pontos de análise do projeto, não representando realidade à possibilidade de percurso veicular.

Em função das características topográficas da área definida como piloto de estudo, sabe-se que esta, possui relevo com traços típicos de chapada. Ou seja, suas superfícies, em sua maioria, são compostas de terras onduladas, possuindo em menor espaço um terreno planificado. A fim de conhecimento, o município de Uberlândia, possui uma altitude média de 887 m (BORGES, 2019). Quanto às caracterizações altimétricas do distrito de Miraporanga, torna-se conhecido que sua altitude média se encontra no valor de 766 m, possuindo assim, declividades significativas à

execução do trajeto origem-destino-origem (Garagem-coleta-aterro). Os modelos topográficos obtidos através de imagens de satélite fornecidas pelo software Google Earth Professional expressam que os dois pontos mais importantes (Garagem-coleta-aterro). para o projeto apresentam diferenças de níveis significativas. Estas diferenças topográficas impactam diretamente no planejamento viário de malhas rodoviárias, uma vez que as vias para acesso de deslocamento estarão caracterizadas por maiores oscilações de declividade (greide). Estas oscilações tornam-se variáveis diretamente proporcionais ao projeto, uma vez que os esforços mecânicos produzidos por um veículo de carga para se deslocar em greides mais acentuados ocasiona um aumento no consumo de combustível e conseqüentemente nas emissões de GEE.

4 METODOLOGIA

De acordo com os tópicos abordados nas seções anteriores, este capítulo descreve as principais ferramentas utilizadas para as aquisições dos resultados que buscaram otimizar o serviço de coleta de RSU. Devido à complexidade de variáveis coletadas, estudadas e manipuladas, as seções descritas aqui são subdivididas em categorias que informam, descrevem, enumeram e por fim, analisam os resultados das rotas de coleta. Esta segmentação foi planejada a fim de facilitar o entendimento e a compreensão do processo construtivo da metodologia aplicada.

4.1 AHP

Visto a atender a individualidade desta pesquisa, foi desenvolvida a AHP, com o objetivo de determinar as variáveis que apresentassem maior peso para o processo de roteirização desta pesquisa. A ferramenta AHP foi executada a partir de 10 variáveis que interferissem neste processo. Sendo elas: Dimensionamento da frota; Distância; Inclinação de Greide; Velocidade; Jornada de Trabalho; Infraestrutura Viária; Demanda; Trânsito Típico; Capacidade e Custo de Implementação. Devido à complexidade e a relação numérica destas variáveis, julgou-se importante o levantamento de três cenários diferentes.

Quanto aos cenários, estes foram fragmentados a partir de 3 atores distintos de forte influência à pesquisa. São eles, os stakeholders vinculado a empresa prestadora de serviço de coleta de RSU e ao órgão municipal responsável pelo setor de coleta da prefeitura; a comunidade científica e o atual

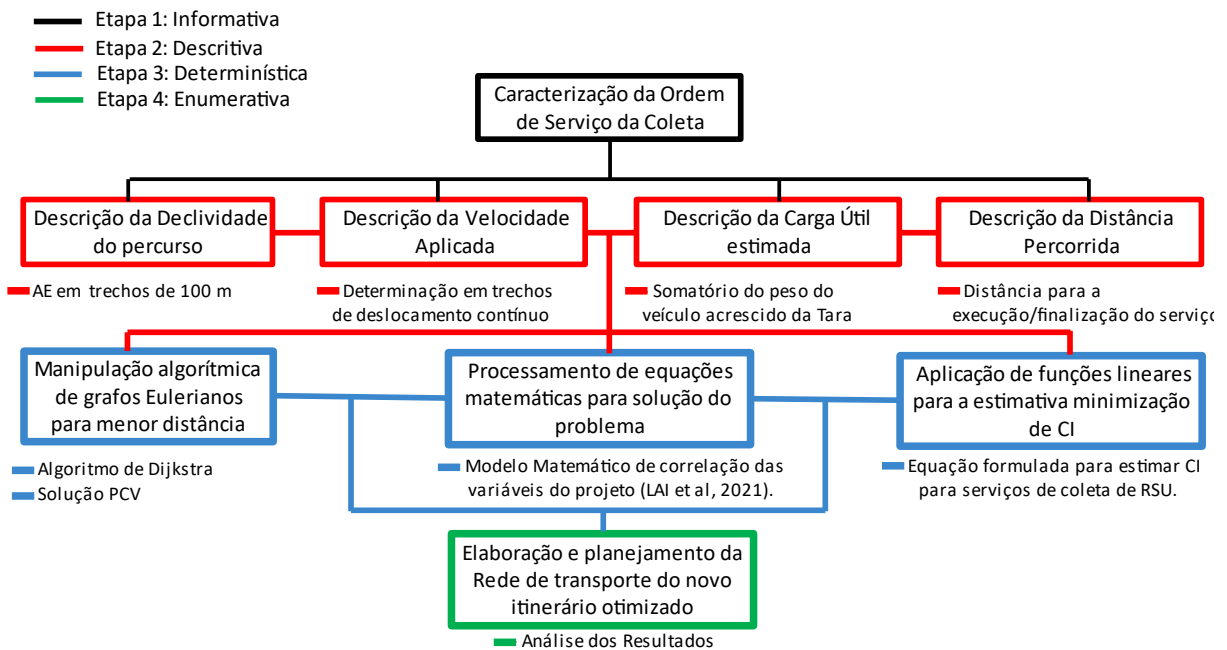
estado da arte, e por fim, um especialista em engenharia de transportes. Definida a ponderação e os pesos e com os 3 cenários definidos e projetados, foi construída uma árvore de decisão referente à correlação dos módulos e de cada nota avaliada.

4.2 ESTUDO DE CASO

A realização do serviço de coleta de RSU do distrito de Miraporanga, inicia-se no município de Uberlândia-MG, onde está localizada a sede da empresa executora do serviço, LIMPEBRAS. Assim, o processo de coleta inicia-se na garagem da frota de veículos, que neste caso em específico, apresenta a mesma localização geográfica do aterro sanitário, etapa de finalização do serviço. A coleta do distrito estudado é realizada duas vezes na semana, a saber todas as quartas-feiras e sábados.

Devido à complexidade das variáveis estudadas nesta pesquisa, a metodologia foi seccionada em 4 etapas decorrentes. Sendo elas: informativa, descritiva, determinística e enumerativa. O detalhamento de cada uma está representado em forma de diagrama, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama da metodologia.



Fonte: Autor (2022)

Assim, a etapa informativa, explora os dados atuais existentes da Ordem de Serviço (OS) para a execução da coleta, é uma etapa estritamente explicativa. A etapa descritiva além de informar dados quantitativos, ela os classifica em quadros críticos e aceitáveis. Já a etapa determinística é um estágio estritamente matemático de determinação numérica dos dados adquiridos nas etapas anteriores. E por fim, a etapa enumerativa é uma etapa de comparação dos dados obtidos no projeto.

4.2.1 Etapa Informativa: Caracterização da OS

Conforme representação da Figura 2, referente à Etapa informativa, os dados coletados foram adquiridos por meio do detalhamento das OS disponibilizadas pelos stakeholders: a empresa de execução do serviço e o órgão responsável municipal vinculado à Prefeitura. A saber, a empresa LIMPEBRAS e a Diretoria de Resíduos Sólidos do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DGRS-DMAE, 2021). A metodologia aplicada foi construída a partir de técnicas de avaliação do serviço. Estas técnicas foram desenvolvidas por meio de entrevista pessoal realizada ao funcionário responsável pela condutibilidade do veículo de coleta, e também, por meio do compartilhamento de documentos que detalham indicativos da execução do serviço (DGRS-DMAE, 2021).

As informações da OS coletadas referente ao descarte, pontos de coleta, rotas do itinerário, velocidade, duração e frequência da execução do serviço, número de viagens por dia, capacidade do veículo e dificuldades enfrentadas na coleta, foram coletadas com o intuito de entender minuciosamente a natureza do problema e os possíveis custos de operação para o consumo de combustível. A apuração de todas estas variáveis foi inserida às classes principais que conduzem esta pesquisa, sendo elas: os dados topográficos, a carga útil do veículo, a velocidade aplicada e por fim, a distância percorrida.

O questionário aplicado referente a entrevista mencionada acima foi composto por 10 perguntas que objetivavam detalhar as características físicas e funcionais do veículo, do percurso, e conseqüentemente, a relação entre o tempo, a distância e o gasto de combustível para a execução do serviço. Desta forma, abaixo estão descritos o detalhamento das perguntas realizadas ao setor de DGRS-DMAE.

- 1) Qual a periodicidade (frequência de dias) da execução da coleta?
- 2) Qual a distância (Km) percorrida para execução do serviço (Considerando a saída da garagem, a coleta de lixo e o retorno a garagem)?
- 3) Qual a velocidade média (Km/h) do veículo durante o trajeto?
- 4) Qual o tempo para a execução e a conclusão do serviço?
- 5) O serviço de coleta de lixo de Miraporanga-MG é executado em quantos veículos?
- 6) O serviço é realizado em quantas viagens?
- 7) Qual o horário e dia(s) da coleta?
- 8) Qual a capacidade de compactação do veículo coletor?
- 9) Qual o combustível utilizado no veículo, e conseqüentemente qual a média de km que o veículo realiza por litro?
- 10) Quais as maiores dificuldades do trajeto (Trânsito, infraestrutura e qualidade das vias, declividade) para execução do serviço?

Assim, por meio do questionário aplicado, dos formulários respondidos, das informações de cartilha digital fornecidas pelo site da Secretaria de Planejamento Urbano da Prefeitura Municipal de Uberlândia (SEPLAN), e por fim, da documentação enviada pela DGRS-DMAE foi possível realizar a consistência dos dados existentes.

4.2.2 Etapa Descritiva: Caracterização das variáveis de estudo por meio de AE

O método de coleta espacial utilizado foi determinado com base em uma análise territorial, caracterizada pela aplicação e pela utilização de SIG. Desta maneira, os dados obtidos por meio da AE foram adquiridos por meio de dois *softwares* distintos que fornecem imagens orbitais de alta resolução não ortorretificadas. São eles: o *Google Earth Professional* (GEP) e *QGIS*. Assim, as rotas possíveis de acesso foram demarcadas em camadas vetoriais com o auxílio de ferramentas de complementos do *Open Street Maps* (OSM) disponíveis no *software QGIS*.

No *software QGIS* a construção destas camadas foi trabalhada de acordo com as características morfológicas e topográficas do estado físico e qualitativo da infraestrutura da rede viária de toda a área de estudo. A partir disto, variáveis da intensidade de tráfego existente para os horários de coleta, das direções de deslocamento, e por fim, das características tridimensionais das vias de acesso (greide, distância, abrangência da faixa para deslocamento) de possíveis trajetos para a execução do serviço foram analisadas em trechos fragmentados visando oferecer maior confiabilidade e menores oscilações de dados. O objetivo baseou-se em projetar os perfis longitudinais dos dados coletados das vias de acesso. Para satisfazer este objetivo foi utilizado o GEP, com a função de entender as características de declividade viária e as variáveis médias de inclinação para cada trecho pré-determinado.

Esta etapa foi modelada e desenvolvida com o objetivo de compreender os pontos críticos para cada variável analisada. A partir destes pontos, a determinação da tomada de decisão para a melhor resolução do problema foi explicada na etapa determinística, descrita na seção 3.3.3.

Quanto a modelagem da rede de Miraporanga juntamente com os custos de cada arco, estes foram definidos através de ferramenta de “Novo Caminho” acessadas através do *software Google Earth Professional* que permitiram calcular a distância de cada arco da rede de coleta (Figura 14).

Figura 14 – Custos dos arcos da rede de Miraporanga.

NÓS DA REDE	PONTOS	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X	Z	Ç	Y	W	a
A	1	0	269	340	468	595	780	776	640	518	374	808	578	548	410	344	281	128,83	576	519	506	400	444	334	439	706	702	672	643
B	2	269	0	72,21	199	327	513	499	365	243	101	545	485	466	324	262	195	134,56	494	440	424	314	541	430	174	452	512	499	389
C	3	340	72,21	0	130,99	257	447	438	306	184	37,53	477	423	394	252	191	119,58	211	419	367	351	248	455	357	108	376	436	425	315
D	4	468	199	130,99	0	127,83	315	313	179	57,87	170	350	313	285	136,29	200	253	337	301	247	236	249	467	362	234	249	306	299	190
E	5	595	327	257	127,83	0	186,22	198	65,22	188	296	237	190	155,43	262	326	372	461	356	377	365	379	500	488	368	124	181	169	61,1
F	6	780	513	447	315	186,22	0	92,72	221	344	487	305	216,66	251	391	455	517	648	392	448	460	510	538	621	544	161	102	129	219
G	7	776	499	438	313	198	92,72	0	133,19	259	398	216,2	308	341	455	519	552	695	484	540	553	657	628	676	462	248	192	218	256
H	8	640	365	306	179	65,22	221	133,19	0	122,96	264	174,71	249	218	318	381	427	503	426	433	422	442	566	555	333	182	241	233	123
I	9	518	243	184	57,87	188	344	259	122,96	0	142,66	213,71	361	339	199	264	298	374	364	308	294	314	438	424	204	302	358	352	242
J	10	374	101	37,53	170	296	487	398	264	142,66	0	356	466	431	291	228	163	244	450	386	373	269	486	379	71,97	419	479	469	359
K	11	808	545	477	350	237	305	216,2	174,71	1213,71	356	0	424	393	415	478	517	601	580	523	511	525	662	645	420	360	413	442	296
L	12	578	485	423	313	190	216,66	308	249	361	466	424	0	30,81	169	237	299	488	171,23	222	238	276	314	390	524	134	118	85	128
M	13	548	466	394	285	155,43	251	341	218	339	431	393	30,81	0	140,28	205	267	414	203	243	233	257	356	368	493	155	150	125	93,6
N	14	410	324	252	136,29	262	391	455	318	199	291	415	169	140,28	0	64,15	129	278	170	117	100,09	121	252	229	353	292	290	260	230
O	15	344	262	191	200	326	455	519	381	264	228	478	237	205	64,15	0	66,2	210	227	176	166	52,82	273	159	283	366	358	330	298
P	16	281	195	119,58	253	372	517	552	427	298	163	517	299	267	129	66,2	0	150,5	291	241	229	122	335	235	227	417	417	386	366
Q	17	128,83	134,56	211	337	461	648	695	503	374	244	601	448	414	278	210	150,5	0	441	387	376	274	309	202,2	305	573	570	539	514
R	18	576	494	419	301	356	392	484	426	364	450	580	171,23	203	170	227	291	441	0	54,37	66,8	55,5	152	256	521	302	293	252	296
S	19	519	440	367	247	377	448	540	433	308	386	523	222	243	117	176	241	387	54,37	0	12,05	119	129,27	226	468	355	344	311	346
T	20	506	424	351	236	365	460	553	422	294	373	511	238	233	100,09	166	229	376	66,8	12,05	0	106,57	146	211	447	372	360	322	331
U	21	400	314	248	249	379	510	657	442	314	269	525	276	257	121	52,82	122	274	55,5	119	106,57	0	217	115,59	340	406	464	436	359
V	22	444	541	455	467	500	538	628	566	438	486	662	315	356	252	273	335	309	152	129,27	146	217	0	106,73	563	459	444	409	440
X	23	334	430	357	362	488	621	676	555	424	379	645	390	368	229	159	235	202,2	256	226	211	115,59	106,73	0	468	529	555	525	465
Z	24	439	174	108	234	368	544	462	333	204	71,97	420	524	493	353	283	227	305	521	468	447	349	563	468	0	495	552	535	434
Ç	25	706	452	376	249	124	161	248	182	302	419	360	134	155	292	366	417	573	302	355	372	406	459	529	495	0	59,4	50,2	57,2
Y	26	702	512	436	306	181	102	192	241	358	479	413	118	150	290	358	417	570	293	344	360	464	444	555	552	59,4	0	36,3	119
W	27	672	499	425	299	169	129	218	233	352	469	442	85	125	260	330	386	539	252	311	322	436	409	525	535	50,2	36,3	0	112
a	28	643	389	315	190	61,1	219	256	123	242	359	296	128	93,6	230	298	366	514	296	346	331	359	440	465	434	57,2	119	112	0

Fonte: Autor (2022)

Desta maneira, todos os números expressos entre os cruzamentos de linhas e colunas foram expressos em centímetros e diz respeito ao custo de todos os arcos da rede de coleta. Posteriormente foram manipulados através de solver e também por meio de um script para a resolução do caminho de menor distância através do algoritmo de Dijkstra (Python).

4.2.3 Etapa determinística: funções lógicas e matemáticas para resolução do problema

A partir da metodologia descrita na seção anterior, tornou-se possível a criação de toda a base de dados geoespaciais construídas a partir do *software QGIS*. No *software* foi utilizado um complemento de análise e cálculo numérico conhecido por “*ORSTOOLS*”, considerado para os resultados desta pesquisa, a ferramenta com maior precisão às exigências e às premissas do projeto. É importante destacar que outras ferramentas foram testadas a fim de obter resultados de menor distância de percurso. São elas: *Online Routing Mapper (ORM)*, *PgRouting Layer*, *Qnet 3*, *Hqgis*, *OpenTripPlanner*.

Definida a ferramenta de maior aderência (*ORSTOOLS*), nela foram inseridas duas camadas vetoriais de entrada. A primeira correspondente à localização geográfica pontual dos pontos (nós)

de coleta de RSU e a segunda compreendida pela camada vetorial (linha) da base de dados do *OSM*. Referente a esta segunda camada, de forma a obter melhores resultados, todas as linhas foram submetidas à ferramenta de fechamento de geometrias, tornando assim toda rede viária compacta e congruente para o detalhamento das rotas.

4.2.3.1 Determinação do caminho mais curto e características da rota encontrada

Após inserção das camadas de entrada, e juntamente com a matriz de cálculo para a implementação do algoritmo de Djisktra, aplicou-se o cálculo de rotas a partir da camada de nós à abrangência espacial da camada de linhas. A aplicação realizada para o projeto se deu através do PCV, onde a restrição principal foi fundamentada em determinar o percurso com menor distância a partir de um único ponto de origem e destino. Assim, a rota projetada saiu de um ponto, percorreu todos os pontos da camada vetorial inserida e retornou ao ponto de origem.

Após a determinação do menor caminho as variáveis analisadas e coletadas a partir dos traços desta rota foram salvas em formato shapefile (shp.) A partir destes resultados e com auxílio de AE, foram manipulados outros complementos *no software QGIS* a fim de caracterizar a intensidade de tráfego, os sentidos e as caracterizações das dimensões da malha viária, a direção do fluxo de tráfego, e por fim as extensões e larguras das ruas utilizadas para o percurso. Toda a rede viária da rota foi segmentada em trechos de 100m a fim de compreender as inclinações de greide existentes conforme a literatura (DNIT, 2010; AASHTO, 2012).

Os resultados geocodificados com o auxílio de imagens de satélite (*QuickBird*) que caracterizam via banco de dados espaciais o endereço da garagem, aterro e dos pontos de coleta foram correlacionados às ferramentas de *API* do *Google* e da plataforma *Open Route Service*, e posteriormente desenvolvidos e trabalhados a partir do estudo das variáveis de distância, tráfego e declividade dos trajetos possíveis para um veículo de carga. Esta etapa foi realizada visando realizar o fechamento viário de todas a rede de coleta, evitando projeções de caminhos inexistentes.

Já os resultados referentes à determinação da velocidade ideal para o projeto foram conduzidos e modelados a partir das características de velocidade viária mínimas e máximas de cada via contemplada pela rota de menor caminho. Como premissa, visto a atender a redução de esforços

mecânicos do veículo e seu consequente gasto de combustível em função da velocidade aplicada, adotou-se que os trechos viários com considerável inclinação precisavam ser modelados com velocidades maiores, uma vez que pela ação da gravidade atuante a um veículo de carga, o consumo de combustível é maior em velocidades reduzidas. Já em trechos de planicidade, velocidades mínimas foram adotadas dentro da faixa de velocidades permitidas das vias na área de estudo (HUANG et al 2019). A partir disto, foi obtida uma média visando evitar picos de aceleração e desaceleração. Desta maneira, foi determinada uma velocidade constante ideal para o projeto.

A Tabela 9 descreve os nomes das vias pelo qual a rota modelada foi projetada. É importante salientar que a média foi embasada no cálculo de limites inferiores e superiores de velocidade de cada via para a redução de esforços mecânicos de um veículo de carga em condições planas e em declives.

Tabela 9- Limite de velocidades pertencente à manipulação da rota

Vias	Velocidade Máxima
1) Anel Viário ST Norte	80 Km/h
2) Rua dos Taróis	60 km/h
3) Av. Juscelino K.	60 km/h
4) Av. dos Eucaliptos	50 km/h
5) Av. Asp. Mega	60 km/h
6) Av. Getúlio Vargas	50 km/h
7) MGC 455	100 km/h
8) Rua dos Flamingos	50 km/ h
9) Av. Aldo Borges Leão	60 km/h
10) Anel Viário St Oeste	80 km/h
11)MGC 497	100 km/h

Fonte: Autores (2022)

4.2.4 Estimativa de RSU produzido para modelagem de carga útil do veículo

Associado à quantidade de esforço mecânico e energia produzida pelo veículo coletor para transportar a carga necessária de demanda do processo, foi estimado a quantidade de lixo produzido a ser coletado. A finalidade deste cálculo foi estruturada em compreender a demanda de lixo a ser recolhida, de forma a planejar a disposição das frotas de coleta e possíveis viagens a serem realizadas. A estimativa utilizada para o cálculo de resíduos produzidos foi referenciada a partir do

modelo local de variáveis socioeconômicas conjunturais expressas na Equação 9 (DIAS et al, 2012). Dentre os modelos testados, este foi o que mais se aproximou à realidade para a área de estudo.

$$Y = - 0,00000005 x^2 + 0,0006 x + 0,2848 \quad (9)$$

Onde:

Y = Produção diária de RSU per capita (kg/hab. dia);

x = Renda per capita mensal (R\$/mês).

Os dados utilizados foram adquiridos e trabalhados com base nas informações censitárias de rendimento nominal domiciliar (renda per capita) do distrito de Miraporanga baseado em dados do IBGE (2010). Com o intuito de correlacionar os resultados adquiridos à realidade e à demanda do serviço executado, foram coletados dados que caracterizam a periodicidade da coleta, a capacidade de carga do veículo utilizado e a quantidade da frota disponibilizada para a conclusão do processo.

4.2.5 Estimativa de GEE e formulação do PRP

Os dados obtidos na seção anterior foram associados aos resultados de cálculo estimado das emissões de GEE da frota de diesel (veículos de coleta de resíduos sólidos), baseado na Equação (1) da Capítulo 2.

Os cálculos realizados foram fundamentados pela compatibilização de informações disponibilizadas para a circulação de veículos de carga à diesel, sendo suas bases de origem tabelas do IPCC (1996), do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2010) e por fim, CETESB (2016). Após isso, os cálculos foram realizados a partir da Equação (2).

A fim de solucionar o PRP aplicou-se uma função lógica que correlacionou os valores encontrados à realidade local. De forma a compreender o comportamento dos resultados finais, um modelo matemático de precificação de custos foi inserido. Esta etapa foi manipulada a partir de configurações de linguagem computacionais para solução de problemas numéricos e computação

matemática disponibilizada a partir do *software GNU Octave*. Vale ressaltar que este modelo foi adaptado de Lai et al., (2021).

Foram modeladas as emissões de CO₂ através do método de compreensão modal de emissões (CMEM) para um veículo de carga leve, enquadrado ao caminhão de coleta de lixo (DGRS-DMAE, 2021). Assim, a Tabela 10, expressa a relação dos valores numéricos para a presente pesquisa.

Tabela 10 – Parâmetro variáveis CMEM.

Símbolo	Descrição	Parâmetros Veículo de Carga Leve
Fk	Fator de atrito do motor (kJ/rev/litro)	0,23
Nk	Velocidade do motor (rev/s)	35
Vk	Cilindrada do motor (litros)	3
Ak	Área da superfície frontal de um veículo (m ²)	5
C_k^d	Coefficientes de arrasto aerodinâmico	0,32
C_k^r	Coefficientes de resistência ao rolamento	0,01
rk	Aceleração do veículo (m/s ²)	0
Wk	Peso do freio (Kg)	2,300
K	Valor de aquecimento para combustível (Kj/g)	45
€	Parâmetro de eficiência do veículo	0,4
\$	Parâmetro de eficiência do motor	0,9
Ξ	Relação de massa combustível-ar	1
ψ	Fator de conversão de gramas a litros	737
g	Gravidade (m/s ²)	9,81
P	Densidade do ar (Kg/ m ³)	1241

Fonte: Adaptado Barth and Boriboonsomsin (2009)

Assim, havendo uma sequência de segmentos de via (trechos fragmentos em 100 m) associados em cada arco e que são denotados por S_e . Sendo d_{es} a distância percorrida do segmento $s \in S_e$, e x_{ke} a carga útil do veículo k ao percorrer o arco e . Para percorrer a sequência de segmentos de estrada associados no arco e , a quantidade de consumo de combustível do veículo k pode ser determinada pela Equação 10.

$$\alpha_{ke} \frac{1}{v_k} + \beta_{ke}(w_k + x_{ke}) + \gamma_{ke} v_k^2 = 0 \quad (10)$$

Onde:

$$\alpha_{ke} = \frac{\xi F_k N_k V_k \sum_{s \in S_e} d_{es}}{\kappa \psi} \quad (11)$$

$$\beta_{ke} = \frac{\xi \sum_{s \in S_e} d_{es} (r_k + g \sin \varphi_{es} + g C_k^r \cos \varphi_{es})}{1000 \varepsilon \kappa \psi} \quad (12)$$

$$\gamma_{ke} = \frac{0.5 \xi C_k^d A_{kp} \sum_{s \in S_e} d_{es}}{1000 \varepsilon \kappa \psi} \quad (13)$$

Obtidos os valores numéricos de consumo de combustível através dos parâmetros expressos nas Equações de 11 a 13, foram determinadas adaptações quanto aos valores de velocidade ideal para o projeto (LAI et al, 2021). Sendo elas: Não ultrapassar o tempo de execução do serviço atual; manter Torque de aproximadamente 1200(N.m) com RPM de 2700; Reduzir acelerações e desacelerações; manter uma velocidade constante maior em inclinações; manter uma velocidade constante mínima em planicidade (CHRIPTONIC, 2010).

Desta forma foram mapeadas através de dados do SETTRAN, todas os limites de velocidade das vias contempladas pelo percurso. Esta caracterização visou estabelecer os limites possíveis de velocidade aplicada dentro dos limites de velocidade máxima e mínima de cada via, sendo toda construção da base de dados e cálculos numéricos realizadas no software *GNU Octave e Excel*.

4.3 ESTIMATIVA DO CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO

Por fim, uma equação matemática foi formulada em função da média ponderada de pesos dos resultados da AHP e dos módulos das variáveis analisadas. Estas, multiplicada à hora trabalhada em relação a jornada de trabalho dos funcionários. A equação (9), descrita na seção 4, estima o CI para execução de serviços de coleta de RSU para veículos de carga útil leve que se deslocam a partir do consumo de diesel.

4.4 ANÁLISE FINAL

Após o desenvolvimento e manipulação dos valores encontrados nas seções anteriores e por meio do manuseio do *software* de geoprocessamento QGIS, foram analisados e mapeados todos os resultados encontrados referente à execução do serviço atual versus o modelo de rotaproposta, sendo toda construção da base de dados e cálculos numéricos realizadas no *software* *GNU Octave* e *Excel*.

Por fim, após a representação numérica e estatística de todos os dados, os resultados obtidos propostos foram comparados aos resultados de roteirização calculados a partir da execução atual da coleta.

5 RESULTADOS

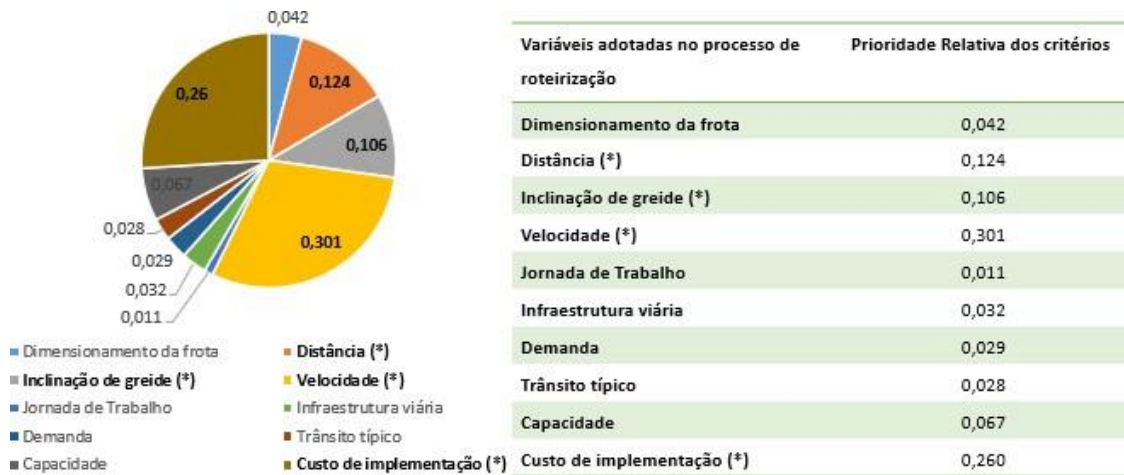
Neste capítulo é abordado com maiores detalhes numéricos e espaciais as representações cartográficas, as avaliações do modelo metodológico com os resultados da otimização proposta.

5.1 AHP

Constatou-se que a morfologia urbana, as configurações das redes viárias, a carga transportada e as características geográficas do objeto de estudo, influenciam diretamente na decisão de uma rota inteligente. Assim, o primeiro cenário expresso referente à aplicação da AHP, representado

graficamente na Figura 15 descreve o cenário de tomada de decisão referente à avaliação dos *stakeholders*.

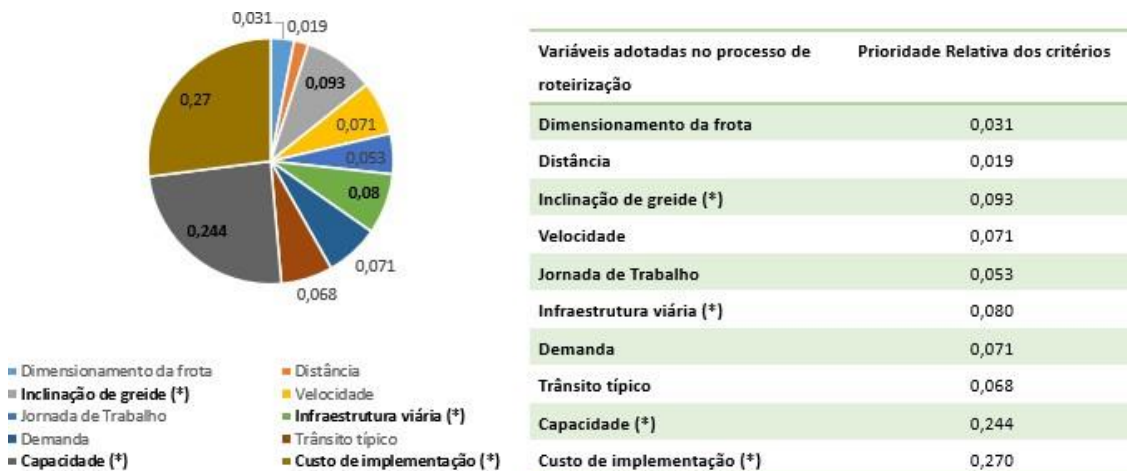
Figure 15- Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto avaliadas pelos stakeholders.



Fonte: Autor (2022)

Os resultados da avaliação do segundo autor, a saber um especialista em transporte, estão expressos na Figura 16.

Figure 16– Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto avaliadas por um especialista.



Fonte: Autor (2022)

Por fim, um último cenário foi construído. Este, referente ao atual estado da arte sobre problemas de roteirização logística inseridas ao PRP (SAVELSBERGH E VAN WOENSEL, 2016; BEKTAS E LAPORTE, 2011; RAEESI E ZOGRAFOS, 2019; ERDOGAN E MILLER-HOOKS, 2012; MOGHDANI ET AL., 2020; FRANCESCHETTI *et al.*, 2013; KOC *et al.*, 2014, 2016; BRUNNER *et al.*, 2019; MOGHDANI *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2020; RAEESI AND ZOGRAFOS ,2019; DABIA *et al.*, 2017; FUKASAWA *et al.*, 2016). A Figura 17 expressa o último cenário de análise para tomada de decisão do projeto.

Figure 17 – Resultado da avaliação multicritério das variáveis do projeto pelo atual estado da arte.



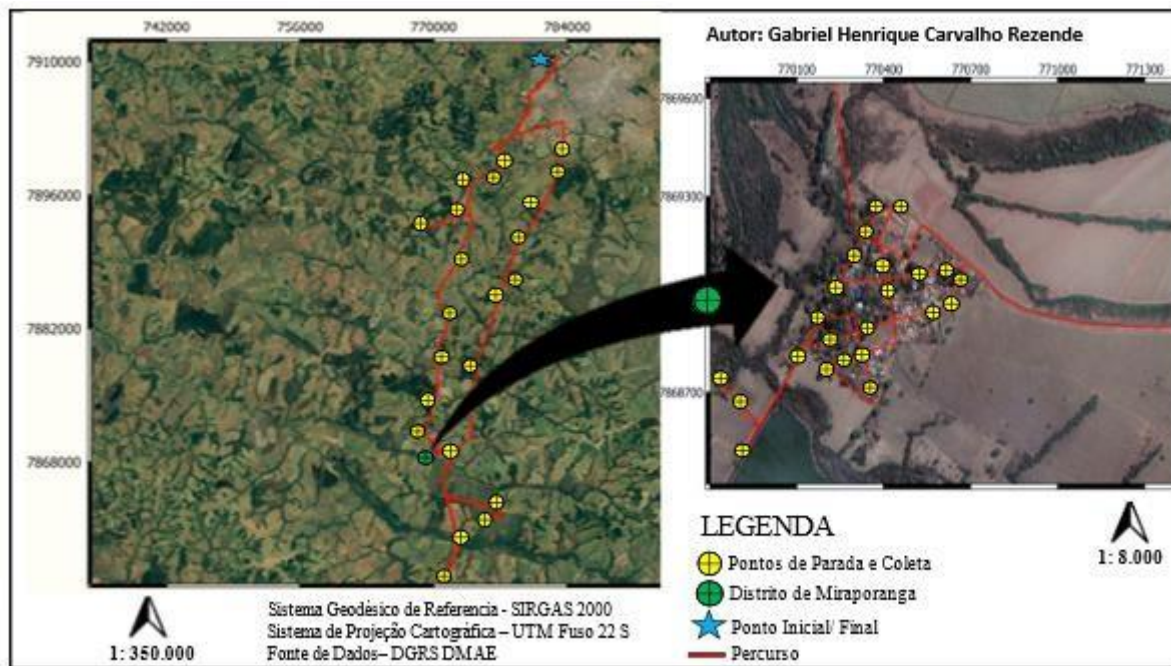
Fonte: Autor (2022).

5.1.1 Árvore de Decisão

A Figura 18 representa as hierarquizações e a correlação de todas as variáveis avaliadas nos 3 cenários. Este processo objetivou compreender quais fatores necessitam receber maior atenção no processo de coleta de dados e obtenção de resultados. É importante ressaltar que a representação das variáveis simbolizada por retângulos na imagem abaixo foram especializados de acordo os módulos encontrados na AHP.

De forma a representar cartograficamente as informações descritas acima, a Figura 19 ilustra os pontos de início e finalização do serviço, os traços do percurso, e finalmente o detalhamento e localização geográfica dos pontos de parada para execução da coleta de RSU.

Figure 19– Mapeamento e detalhamento do itinerário da coleta de lixo em Miraporanga-MG.



Fonte: Autor (2022).

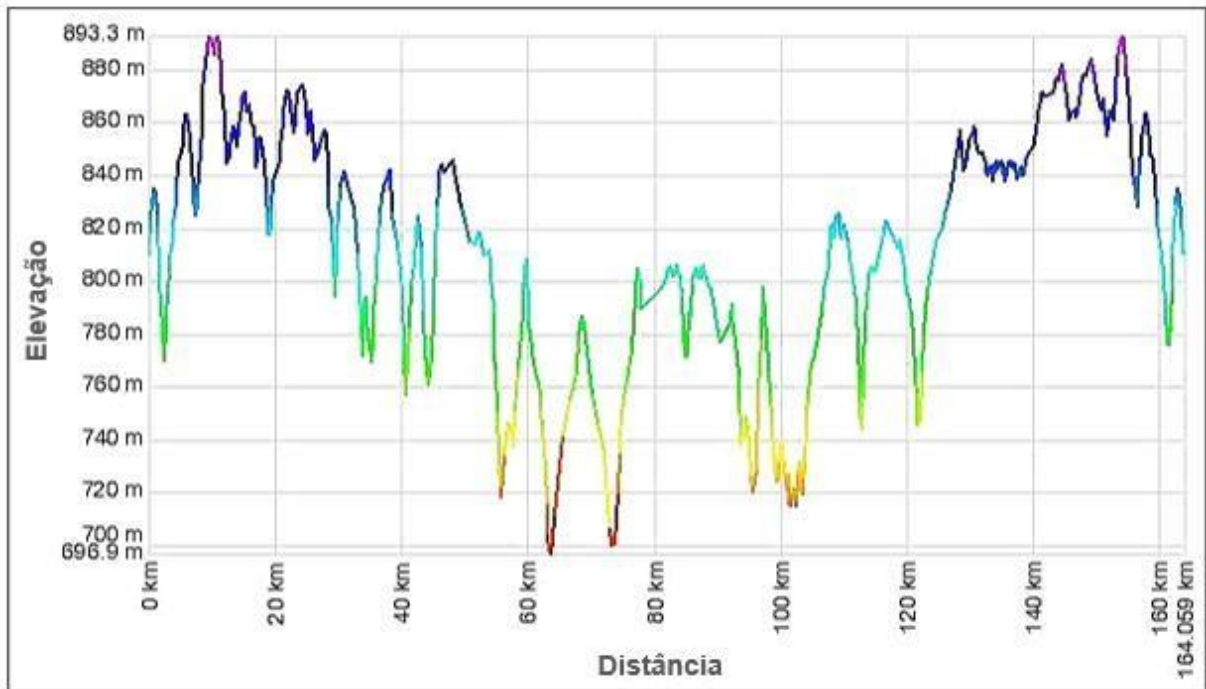
Quanto às características tridimensionais da rede viária utilizada para a execução da coleta, sabe-se que todas as vias percorridas são de duplo sentido. Ainda, o percurso apresenta uma declividade média de 1,85 % de inclinações e oscilações de greide, com inclinações máximas de aclive chegando a 6,8 % e declives máximos de 7,9 % (Tabela 11). A Figura 20 ilustra o perfil longitudinal de todo o percurso atual.

Tabela 11 - Detalhamento sobre a atual rota.

	Distância percorrida	Ganho total de elevação viária	Perda total de elevação viária	Intervalo da altitude do trajeto	Inclinação Média
Itinerário	164.059 km	1864 m	1864 m	198 m	1,9 %

Fonte: Autor (2022)

Figure 20– Representação do perfil longitudinal do itinerário atual.



Fonte: Autor (2022)

Com a funcionalidade de apresentar facilidade de compreensão ao leitor, uma semiologia gráfica de saturação de cores foi modelada, onde os contornos expressos por cores de saturação fria (rosa, roxo, azul) representam números de elevação altimétrica maiores e cores com grau de saturação quente (verde, amarelo, vermelho) representam os pontos geográficos com menores altimétricos.

5.2.1 Velocidade Média

Em relação à velocidade em que o veículo é conduzido atualmente, referente às informações da OS, constatou-se que a velocidade média aplicada do veículo é de 71 km/h, sendo as partes constituintes para a coleta no distrito uma velocidade de 15 a 20 km/h. É importante ressaltar que os resultados da velocidade de condução no distrito é uma variável fixa (dados da OS), não podendo ser modificada.

5.2.2 Emissões de GEE

Os valores encontrados por meio da emissão e lançamentos de GEE do veículo de coleta a partir da distância percorrida pelo itinerário realizado estão expostos na Tabela 12. As quantidades específicas de cada gás (i) calculado em gramas em um intervalo anual.

Tabela 12 - Resultados estimados de emissão de GEE.

	Nox	CH4	NM VOC	CO	N2O	CO2
Itinerário atual	16.601,52 g/ano	1.023,73 g/ano	13.740,60 g/ano	2.456,96 g/ano	511,87 g/ano	13.137.894,00 g/ano

Fonte: Autor (2022)

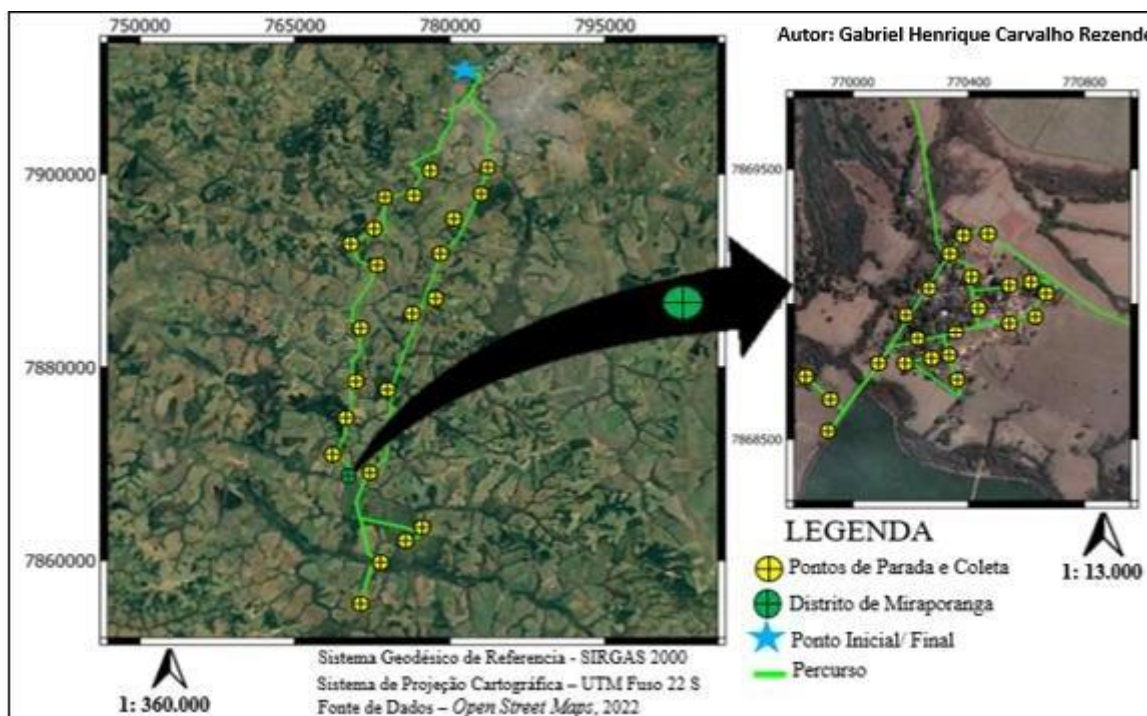
Os valores estimados detalham a análise dos gases produzidos em função dos valores estatísticos encontrados em FE (i). Os valores de emissão de GEE lançados à atmosfera estão diretamente associados à distância percorrida, porém sujeito às alterações de esforços mecânicos produzido pelas oscilações de greide da infraestrutura viária, conforme Figura 8.

5.3 MODELAGEM DA ROTA OTIMIZADA

Referente a uma manipulação algorítmica dos dados expressos na seção anterior, novas possibilidades de percurso foram modeladas a partir do *software QGIS*. De forma que todas as restrições de horário, dias e localidades dos pontos de coleta (totalizando os 45 pontos) foram mantidas, a fim de expressar uma otimização executada mais próxima da realidade atual. É importante ressaltar que mesmo com a mudança de passagem em algumas vias, os pontos de coleta oficial para o recolhimento de RSU foram mantidos, não havendo alterações de número e nem de localidades geográficas destes pontos.

Assim, em relação à distância com a aplicação de caminho curto no *software QGIS*, e a partir do PCV, houve uma redução de 8,3 % na distância percorrida para execução do serviço. Reduzindo a rota de 164,059km para 150,438km. Conseqüentemente, com a manutenção da velocidade de condução do motorista, houve uma redução de 8,3% no tempo de execução do serviço. A Figura 21 exibe a projeção da rota otimizada.

Figure 21–Mapeamento da rota otimizada no município de Miraporanga-MG.



Fonte: Autor (2022)

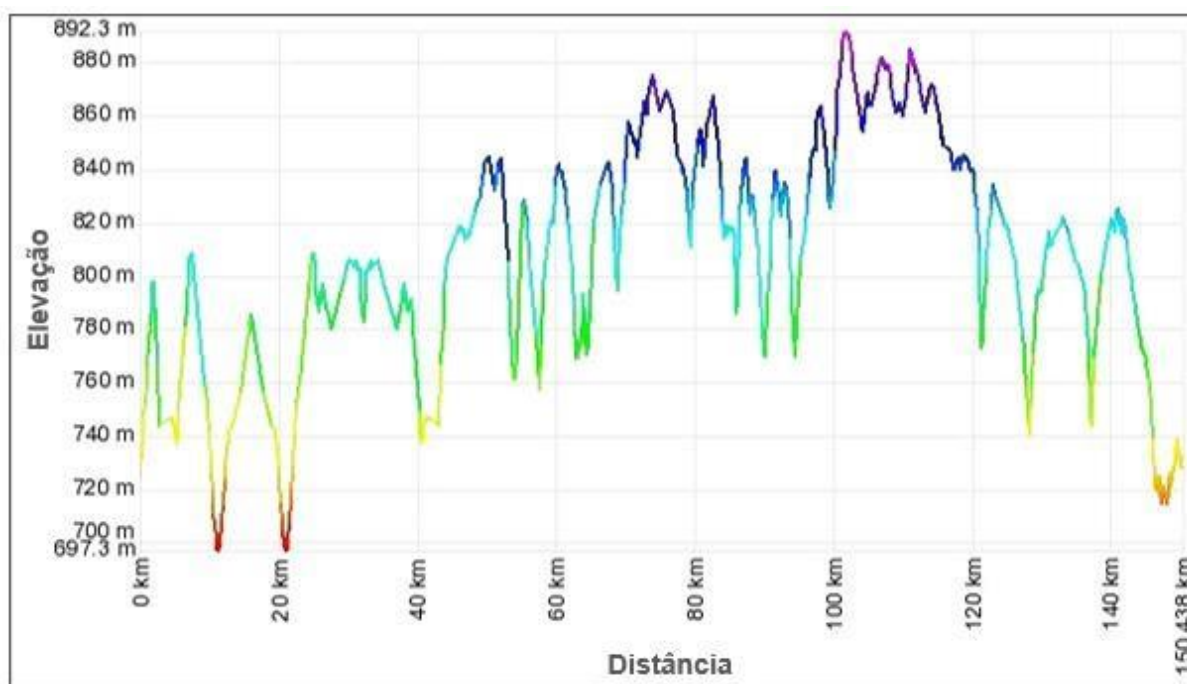
De forma complementar, a Tabela 13 juntamente com a Figura 22 detalham os novos dados tridimensionais para a execução do serviço.

Tabela 13- Detalhamento da rota proposta.

	Distância percorrida	Ganho total de elevação viária	Perda total de elevação viária	Intervalo da altitude do trajeto	Inclinação Média
Itinerário	150.438 km	1791 m	1791 m	196 m	2 %

Fonte: Autor (2022)

Figure 22– Representação do perfil longitudinal do itinerário modelado.



Fonte: Autor (2022)

Visto estabelecer uma comparação das características de greide viário, constatou-se que para o modelo proposto houve uma redução de 3,92% nos ganhos e perdas totais de elevação para execução de todo o percurso. Este, com uma redução no intervalo altimétrico de aproximadamente 1,1%.

5.3.1 Velocidade ideal para o projeto

Referente à velocidade estimada para a execução do serviço, a determinação da velocidade ideal para o projeto, obedecendo os pontos críticos da curva de correlação entre o tempo e o custo de operação foi de $V = 50,15$ km/h.

5.3.2 Emissões de GEE

Devido a diminuição de distância percorrida para realização da coleta de lixo, a Tabela 14 expressa os resultados estimados da produção de GEE para a rota otimizada. Todos os cálculos

foram estimados referente à energia gasta pelo veículo em função da distância percorrida pelo mesmo, para o trajeto que contempla a saída da garagem, a coleta executada e a disposição dos resíduos ao aterro. Os resultados demonstraram que, para execução do serviço no período de um ano, 1416,8 Km foram reduzidos.

Tabela 14– Resultados estimados de emissão de GEE.

	Nox	CH4	NMVOC	CO	N2O	CO2
Rota otimizada	15.223,07 g/ano	938,73 g/ano	12.516,4 g/ano	2.252,95 g/ano	469,36 g/ano	12.047.035,00 g/ano
Rota atual	16.601,52 g/ano	1.023,73 g/ano	13.740,60 g/ano	2.456,96 g/ano	511,87 g/ano	13.137.894,00 g/ano

Fonte: Autor (2022)

Já as projeções dos resultados obtidos para a execução do serviço de coleta no período de 1 ano, levando em consideração a abordagem de uma prestação de serviço precificada, as dimensões de otimização deste projeto revelam que 566,72 litros de diesel seriam economizados. Isso significa que aproximadamente 1.091.759 g de CO₂ deixariam de ser lançados à atmosfera. Assim, uma perspectiva econômica de abastecimento no valor de R\$ 3.173,63 seria projetadaa menos no faturamento da empresa executora do serviço. Isso é decorrente do consumo de combustível consumido pelo veículo. Uma observação a ser realizada é que este valor dependediretamente do valor de precificação do diesel e do estado do veículo utilizado, estando suscintoa alterações em função do tempo e da economia.

5.4 CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO DO SERVIÇO DE COLETA DE RSU

Os resultados oriundos do CI, são os dados numéricos que quantificam a execução do serviço desde o planejamento da rota, distribuição de funcionários, até a completa finalização do serviço no aterro sanitário. Visto estimar estes valores conforme descrito no capítulo 4 deste trabalho, a equação 14 expressa como resultado as variáveis descritas ao longo do trabalho, a fim de compreender o impacto financeiro do serviço.

$$CI = \frac{\sum(\frac{d}{3} \cdot L + D \cdot 0,017 + v \cdot 0,013)}{1} + h \cdot 7,58 \quad (14)$$

Onde:

CI = Custo de implementação;

d = distância percorrida para execução do serviço (m);

L = valor do Litro do combustível utilizado;

D = intervalo de altitude (declividade) do trajeto (m);

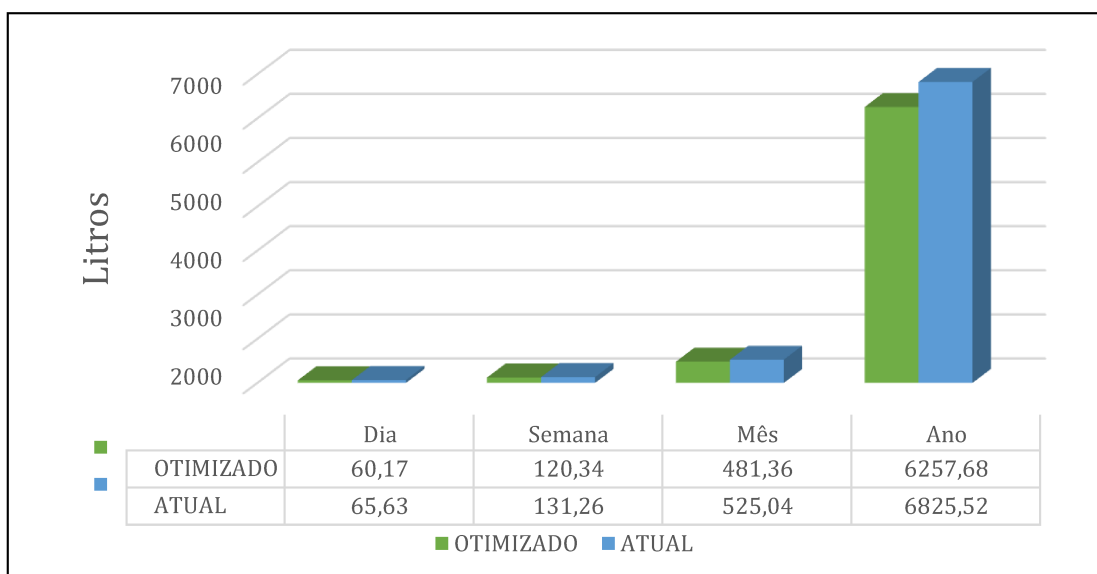
v = velocidade média durante o percurso (m/s);

h = jornada de trabalho em horas de um funcionário (Horas).

Finalmente, os resultados calculados a partir da correlação entre a velocidade aplicada, a distância percorrida, a declividade de cada trecho de análise do percurso e a jornada de trabalho executada pelo funcionário, resultam em uma economia de 16,44 % no consumo de combustível para a execução e a finalização do serviço. Essa porcentagem descreve o resultado de comparação entre o sistema de coleta de RSU atual em função do modelo de rota proposto nesta pesquisa.

Expandindo as projeções dos resultados obtidos para a execução do serviço de coleta no período de 1 ano, levando em consideração a abordagem de uma prestação de serviço precificada, as dimensões de otimização foram representadas por meio de um gráfico de barras (Gráfico 1).

Gráfico 1- Representação periódica comparativa do consumo de combustível para execução do serviço.



Fonte: Autor (2022)

O gráfico revela o comparativo dos resultados seccionados nos principais marcadores de tempo para controle de uma prestação de serviço (Dia, Semana, Mês, Ano). Essas segmentações foram graficamente representadas de forma a ilustrar as dimensões de otimização do projeto em função da execução do serviço em diferentes escalas temporais.

6 CONCLUSÕES

A aplicação de *softwares* livres que objetivam otimizar rotas logísticas para resoluções do PRPe PRV não são frequentemente utilizadas na academia e no ambiente corporativo. Assim, a formulação proposta nesta pesquisa não somente analisou a roteirização da menor distância percorrida, mas correlacionou os resultados desta etapa obtida à produção, emissão e ao lançamento de GEE à atmosfera. Esta decisão de correlação e diminuição da queima de combustível por deslocamento do veículo, e conseqüentemente a redução dos gases emitidos por execução da atividade logística foi tomada devido ao aumento de diretrizes mundiais e nacionais que propõe técnicas de produção de serviços urbanos sustentáveis à comunidade, principalmente aplicadas a área de transporte rodoviário urbano.

Entretanto, as dificuldades de se obter resultados a partir de diferentes plataformas de coleta e manipulação de dados não foram consideradas significativas, uma vez que todas as ferramentas e *softwares* utilizados possuem a sua disposição, uma interoperabilidade de entrada e saída de dados nos mais diversos formatos de adequação e de manipulação, que são acessíveis a todas as plataformas utilizadas.

Desta maneira, foi observado que para a redução destes elementos de poluição, características de distância percorrida, declividade viária e velocidade de condução do veículo estão fortemente ligadas à construção de uma rota inteligente e sustentável. Esta afirmação é justificada à pauta que, para o deslocamento de um veículo de carga submetido a esforços de atrito produzido pelo deslocamento em função da densidade do ar e da gravidade, quanto maiores forem as variáveis de oscilações de greide viário, de distância percorrida e de velocidade aplicada fora dos limites otimizados (40-70 km/h), maiores serão os gastos de consumo de combustível, visto que maiores serão os esforços mecânicos do veículo para seu deslocamento. Proeminentemente a isto, os resultados adquiridos demonstraram que alterações significativas por coleta poderiam ser presenciadas no tempo de execução do serviço, na redução de distância produzida e nos intervalos altimétricos de ganhos e perdas totais de elevação, reduzindo significativamente os gastos econômicos e de poluição para o dimensionamento de uma única frota otimizada pelo PCV.

Em relação a hipótese de que o comportamento e a distribuição espacial de todas as variáveis avaliadas e mencionadas neste trabalho produzissem, a partir do PRP, resultados sustentáveis, constatou-se a validação da mesma, uma vez que através de todo o processo, juntamente norteado aos objetivos específicos como a modelagem e a proposta de uma rota mais econômica, foi possível a minimização de GEE para a execução do serviço. Por fim, concluiu-se ainda que o consumo de combustível quando aplicados ao serviço logístico de carga, fazem correlação às velocidades aplicadas, a distância percorrida e as inclinações do trajeto.

Sugere-se às pesquisas futuras, a aproximação e a correlação de dados em SIG-T com a construção de algoritmos em linguagens de programação que acarretará em amostras mais precisas para a resolução de problemas de grafos para serviços logísticos. De forma mais concisa, o *software* QGIS aceita a implementação de novos *plugins* que otimizam processos de rotas. Assim, como sugestão, espera-se futuramente que com a ligação Python (Linguagem de programação) ao ambiente SIG, um novo *script* e *plugin* possa ser desenvolvido no *software* QGIS a fim de correlacionar e otimizar todas as variáveis do PRP em um mesmo instante, numa mesma plataforma, a fim de obter caminhos logísticos mais verdes que lidam com reduções de GEE.

De forma complementar, em favor da propagação de conhecimento acadêmico e científico, espera-se estabelecer o PRP para funções que solucionam o PCC, uma otimização para problemas de roteirização em arcos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, Ravindra et al. **Network Flows: Theory, algorithms, and applications**. Prentice Hall, Upper Saddle River. p. 863, New Jersey, USA, 1993.

ALI, Syed et al. **Barriers to Reverse Logistics in the Computer Supply Chain Using Interpretive Structural Model**. Global Journal of Flexible Systems Management, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40171-017-0176-2>

ARAKAKI, Rafael; USBERT, Fábio. **An efficiency-based path-scanning heuristic for the capacitated arc routing problem**. Computers & Operations Research. v. 103, p. 288-295, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.018>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. p. 73, São Paulo- SP, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004 –Resíduos sólidos - Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro/RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 37101 - Sistema de gestão para desenvolvimento sustentável – Requisitos com orientação para uso. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo/SP, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 37120: Cidades e comunidades sustentáveis – indicadores para serviços municipais e qualidade de vida. Associação Brasileira de Norma Técnicas, São Paulo/SP, 2017.

BACAU, Simona et al. **Integrating strategic planning intentions into land-change simulations: Designing and assessing scenarios for Bucharest**. Sustainable cities and society, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103446>

BALLOU, Ronald. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial** (5ª. Ed.). Porto Alegre: Bookman Editora, p. 35 e p. 434 – 440. 2006.

BARAHONA, Francisco. **Some Applications of the Chinese Postman Problem**. Algorithms and Combinatorics. Vol 9, Path Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.

BARTH, Matthew. **Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model**. Riverside: University of California, CA, USA, 2005.

BARTH, Matthew; BORIBOONSOMSIN, Kanok. **Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 14, ed. 6, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.004>

_____. **Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems.** Transportation Research Record, v. 21, 2009. <https://doi.org/10.3141/2139-03>

BAZARAA, Mokhtar et al. **Linear Programming and Network Flows.** Wiley-Interscience, 4th edition. New Jersey, USA, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780471703778>

BEALE, Evelyn M. **Branch-and-bound methods for mathematical programming systems.** Hammer PL, Johnson EL, Korte BH, editors. Discrete optimization II. Amsterdam: North Holland, 1979. [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70351-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70351-0)

BEAN, James. **Genetics and Random Keys for Sequencing and Optimization.** Department of industrial and Operations Engineering, Technical Report No. 92-43, University of Michigan, June 1992.

BEKTAS, Tolga; LAPORTE, Gilbert. **The Pollution-Routing Problem.** Transportation Research Part B: Methodological. v. 45. p. 1232-1250, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004>

BERNASCONI, Michele et al. **The Analytic Hierarchy Process and the Theory of Measurement.** Management Science. v. 56. p. 699-711, 2010. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1090.1123>

BERTSIMAS, Dimitris. **Probabilistic combinatorial optimization problems.** Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, MA, USA, 1988.

BIGGS, Norman. **Algebraic Graph Theory.** London School of Economics and Political Science. Cambridge University Press. 2ª edição. London, UK, 2012.

BOLLOBÁS, Béla. **Modern Graph Theory. Graduate Texts in Mathematics.** P. 184, Springer-Verlag, NY, USA, 1988.

BOWLER, Neill et al. **Characterization of the probabilistic traveling salesman problem.** Physical Review E, Vol. 68, 2003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.036703>

BRANCO, Fábio; GIGIOLI, Olívia. **Roteirização de transporte de carga Estudo de caso: distribuidora de tintas e seu método de entregas.** Revista da FAE, v. 17, n. 2, p. 56–81, 2014.

BRODNIK, Andrej et al. **Modifications of the Floyd-Warshall algorithm with nearly quadratic expected-time.** Published in: Ars Mathematica Contemporanea. V. 6, 2021. <https://doi.org/10.26493/1855-3974.2467.497>

BRYMAN, Alan. **Research methods and organization studies.** London: Unwin Hyman, London, UK, p. 283, 1989.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília/DF, 2010.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. p. 1-392. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério do meio ambiente - MMA. Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013: ano-base 2012: relatório final. Brasília, DF, Brasil, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviarios_2013.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2022.

BRITO, Rodrigo. **Uso de sistema de informação geográfica para análise do transporte e disposição final dos resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ilha Solteira, SP. 89p, 2006.

BRUNNER, C. et al. Vehicle routing problem with steep roads. Optimization Online, 2019. URL: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2019/03/7113.pdf. Acesso em 29 mar. 2022

CABALA, Pawel. **Using the Analytic Hierarchy Process in Evaluating Decision Alternatives**. Operations Research and Decisions. v. 1, p. 1-23, 2010.

CÂMARA, Gilberto et al. **Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica**. Introdução a Ciência da Geoinformação. São Paulo, SP: INPE, 2001.

CLARKE, G., WRIGHT, J. W. **Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points**. Operations research, V. 12, ed. 4, p. 568–581, 1964. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO – CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo** - Proconve – Série Relatórios. São Paulo/SP, p. 221, 2016. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wpcontent/uploads/sites/6/2017/11/EMISS%C3%95ES-VEICULARES_09_nov.pdf>. Acesso em: jan. 2022

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO – CETESB. **Plano de controle de poluição veicular (PCPV)**. São Paulo/SP, 2021 , 48p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2021/01/PCPV-Plano-de-Controle-de-Poluicao-Veicular-do-Estado-de-Sao-Paulo-2020-2022.pdf>>. Acesso em: julho, 2021.

CORBERÁN, Ángel et al. **The chinese postman problem with load-dependent costs**. Transportation Science: Baltimore. Articles in Advance, p. 1-26, 2018.

COSTA, L. et al. **Exact branch-price-and-cut algorithms for vehicle routing**. Transportation Science, 53(4):946–985, 2019. <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0878>

CHRISTOFIDES Nicos. **Graph Theory – An Algorithmic Approach**. Academic Press, London, UK, 1975.

_____. **Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem.** Tech. Rep. 388, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, 1976.

CHRISTOFIDES, Nicos et al. **An Optimal method for the Mixed Postman Problem.** System Modeling and Optimization. Control and Information Sciences, vol. 59. p. 641-649, Berlin: Springer, 1984. <https://doi.org/10.1007/BFb0008937>

CHRISTOFIDES, Nicos et al. **An algorithm for the Rural Postman Problem.** Departamento de Management Science. Imperial College, London, UK, 1981.

CORBERÁN, Angel et al. **New results on the Windy Postman Problem.** Mathematical Programming. V. 132, p. 309-332, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10107-010-0399-x>

CRAWFORD, Gordon.; WILLIAMS, Cindy. **A note on the analysis of subjective judgment matrices.** European Journal of Operational Research, v. 29, p. 387-405, 1985. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(85\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-2496(85)90002-1)

DABIA, S. et al. **An exact approach for a variant of the pollution-routing problem.** Transportation Science, 51(2):607–628, 2017. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0651>

DAVIS, Lawrence. **Genetic Algorithms and Simulated Annealing.** Morgan Kaufmann Publishers, 1987.

DAVIS, Lawrence, **Handbook of Genetic Algorithms.** Van Nostrand Reinhold, 1991.

DAVIS, Stacy et al. **Transportation energy data book. Technical report,** Oak Ridge National Laboratory, 2009.

DEMIR, Emrah et al. **An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem.** European Journal of Operational Research. V. 223, p. 346-359, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.06.044>

DEMIR, Emrah et al. **The bi-objective pollution-routing problem.** European Journal of Operational Research, v.3, p. 464-478, 2014a. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.002>

_____. **Review of recent research on green road freight transportation.** European Journal of Operational Research, v.3, p.775-793, 2014b. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO – DMAE. Entrevista concedida aos autores. Diretoria de Gestão de Resíduos Sólidos (DGRS). Uberlândia, MG, Brasil, 2021.

DETOFENO, Thober; STEINER, Maria. **Optimizing routes for the collection of urban solid waste:** A case study for the City of Joinville, State of Santa Catarina. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. July, 2010.

DIAS, David et al. **Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais.** Engenharia Sanitária

e Ambiental. V. 17 . n.3 . 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/VnBTnH8XWYVzFbhd3CsBZYB/?format=pdf>. Acesso em: Setembro, 2021.

DIESTEL, Reinhard. **Graph Theory**. Springer, 5º edição, p. 428, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3>

EDWARDS, Deborah; GRIFFINS, Tony. **Understanding tourists' spacial behavior: GPS tracking as an aid to sustainable destination management**. Journal of sustainable tourism, p. 1-16, 2013.

EISELT Horst et al. **Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem**. Operations Research, Vol. 43, N. 2, 1995a. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.231>

_____. **Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem**. Operations Research, vol. 43, n. 2, March-April, 1995b. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.231>

ELWANY, Alaa et al. **Structured Replacement Policies for Components with Complex Degradation Processes and Dedicated Sensors**. V. 59, 2011. <https://doi.org/10.1287/opre.1110.0912>

ERICSSON, Eva. **Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v.6, ed.5, p.25-345, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7)

FAGERHOLT, Kjetil et al. **Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes**. Journal of the Operational Research Society.

FRANCESCHETTI, Ana et al. **A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem**. European Journal of Operational Research. V. 259, p. 972-991, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.026>

FRANÇA, Carlos; ARANTES, Daniella. **Roteirização através do SIG para coleta de lixo doméstico: Um estudo de caso da cidade de Silvânia-GO**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Curso de Engenharia de Transportes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia, Goiânia-GO, 2019.

FREDERICKSON, George. **Approximation Algorithms for Some Postman Problems**, Journal Association for Computing Machinery. V.26, p. 538-554, 1979. <https://doi.org/10.1145/322139.322150>

GASKA, Krzysztof et al. **A GIS BASED GRAPH ORIENTED ALGORITHMIC MODEL FOR POLY-OPTIMIZATION OF WASTE MANAGEMENT SYSTEM**. Architecture, Civil Engineering, Environment. V. 11, p. 151-159, 2018. <https://doi.org/10.21307/acee-2018-061>

GHIANI, Gianpaolo., LAPORTE, Gilbert. **A branch-and-cut algorithm for the Undirected Rural Postman Problem**. Mathematical Programming. V. 87, p. 467–481, 2000. <https://doi.org/10.1007/s101070050007>

GHOSE, Mrinal et al. **A GIS based transportation model for solid waste disposal** – A case study on Asansol municipality. Waste management, Elsevier, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022>

GOLDBERG, David E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley, 1988.

GOMES, Carlos; RIBEIRO, Priscila. **Gestão da Cadeia de Suprimentos Integrada à Tecnologia da Informação**. Editora Senac Rio, 2ª edição, p. 361, 2013.

GOODCHILD, Michael. **GIS and Transportation: Status and Challenges**. GeoInformatica, v. 4, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1009867905167>

GOODRICH, Michael. **Data structures and Algorithms in C++**. Wiley edit, p. 683. Michigan University, Michigan, USA, 2004.

GUIMARÃES, Roberto; FEICHAS, Susana. **Desafios na construção de indicadores de sustentabilidade**. Ambiente & Sociedade.v. 12, n.2, p. 307-323, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2009000200007>

GROER, Chris et al. **A library of local search heuristics for the vehicle routing problem**. Mathematical Programming Computation v. 2, p. 79–101, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12532-010-0013-5>

GROSS, Jhonatan; YELLEN, Jay. **Graph theory and its applications**. CRC Press. 2ª edição. Flórida, USA, 1998.

GROTSCHTEL, Martil., WIN, Zaw. **Cutting plane Algorithm for the Windy Postman Problem**, Mathematical Programming, Vol. 55, p. 339-358, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF01581206>

HAK, Tomas et al. **A method to assess the relevance of sustainability indicators: Application to the indicator set of the Czech Republic's Sustainable Development Strategy**. Ecological Indicators. v. 17, p. 46-57, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.034>

HOLLAND, John H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**, University of Michigan Press, 1975.

HUTCHINSON, Brian **Princípios de planejamento dos sistemas de transporte urbano**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p. 416, 1979.

HVATTUM, Lars et al. **Routing and scheduling in project shipping**. Springer Verlag, Annals of Operations Research, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Tracking transport 2020**. The international energy agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios: Resultados do universo.** Rio de Janeiro/RJ, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (2018). Areas dos Municípios | Geociências | IBGE. Disponível em: <https://ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=acesso-ao-produto&c=3170206>. Acesso em: agosto/2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2021). Portal cidades. Uberlândia. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>>. Acesso em: junho/2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Análise Espacial de dados Geográficos – Softwares.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/software.html>>. Acesso em: 28 set. 2021.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION – ISWA. **Roteiro para encerramento de lixões,** 2016. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/Panorama/iswa_web3.pdf. Acesso em 28 mar. 2021.

JENSEN, Paul; BARNES, Jon. **Network Flow Programming,** John Wiley & Sons, New Jersey, NJ, USA, 1987.

JOHNSTON, Rick. **Arsenic and the 2030 Agenda for Sustainable Development. In Arsenic Research and global sustainability: Proceedings of the Sixth International Congress on Arsenic in the Environment.** p. 12-14. Published in New York: CRC Press, 2016. <https://doi.org/10.1201/b20466-7>

KAUFFMAN, Arnold. **Graphs, dynamic programming and finite games.** Academic Press, New York, NY, USA, 1967.

KARA, Imdat et al. **Energy Minimizing Vehicle Routing Problem.** International Conference on Combinatorial Optimization and Applications. Combinatorial Optimization and Applications. p 62-71, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73556-4_9

KAWAMOTO, Eiji.; **Análise de sistemas de transporte.** Apostila. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 2015.

KAZA, Silpa et al. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050.** Washington: World Bank, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>>. Acesso em 16 abr. 2021.

KOÇ, et al. **The fleet size and mix pollution-routing problem.** Transportation Research Part B: Methodological, v.70, p.239-254, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.008>

_____. **Thirty years of heterogeneous vehicle routing.** European Journal of Operational Research, v.249, ed.1, p.1-21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.020>

LAI, David ET AL. **The pollution-routing problem with speed optimization and uneven topography.** Production & Manufacturing research. Vol. 8. p. 1-19, 2021.

LETCHEFORD, Adam. **Allocation of School Bus Contracts By Integer Programming.** Journal of the Operational Research Society. Integer Programming and Combinatorial Optimisation, v. 47, p.369-372, 1996. <https://doi.org/10.1057/jors.1996.36>

LIMA, Ed et al. **Adaptation of CMEM modal emission model to the fleet of the city of Maringá, Paraná State, Brazil.** V. 33, p. 17-25, 2011. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i1.5118>

LIMA, Gleyphison et al. Metodologias para estimativa da emissão de poluentes por transporte rodoviário. Instituto Militar de Engenharia IME. p. 14, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

LIU, Yu-Hsin. **Diversified local search strategy under scatter search framework for the probabilistic traveling salesman problem.** European Journal of Operational Research, Vol. 191, ed. 2, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.023>

LOWRY, John; LOWRY, Michael. **Comparing spatial metrics that quantify urban form.** Computers, Environment and Urban Systems, v. 44. p. 59-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.005>

LUCCHESI, Claudio. **Introdução a teoria dos grafos.** Instituto de Matemática Pura e aplicada. Rio de Janeiro, RJ, 1979.

LUZIA, Leandro; RODRIGUES, Mauricio. **Introdução ao escalonamento e aplicações.** Estudo sobre as Metaheurísticas. Instituto de Matemática e Estatística – IME, Universidade de São Paulo – USP. p. 1-38. São Paulo-SP, 2009.

MACRINA, G. et al. **An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows.** European Journal of Operational Research, 276(3):971–982, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.067>

MAYER, Audrey. **Strengths and weaknesses of common sustainability indices for multidimensional systems.** Environment International, v.34, n.2, p. 277-291, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.09.004>

MCKINNON, Alan. **CO2 Emissions from Freight Transport in the UK:** Report prepared for the Climate Change Working Group of the Commission for Integrated Transport 2007. Transport and Climate Change. Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 2007.

MELQUIADES, José Antonio. **Modelagem para a roteirização do processo de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos.** 2015. 145 f., il. Tese (Doutorado em Transportes Urbanos) —Universidade de Brasília (Unb), Brasília, 2015.

MOGHDANI, Reza et al. **The green vehicle routing problem:** A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, page 123691, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691>

MOUTAHIR, Hassane; VICTORIA, Agazzi. **The gvSIG Project**. Infrastructure des Données spatiales et application SIG. p. 16-22, 2014.

MORLOK, Edward. **Introduction to transportation engineering and planning**. Mc Graw-Hill, New York, USA, 1978.

NETTO, Paulo. **Grafos: Teoria, Modelos Algoritmos**. Blucher, 5ª edição.314p. 2012.

NITHYA, Roshini., VELUMANI, Arokiaswamy. **Optimal Location and Proximity Distance of Municipal Solid Waste Collection Bin Using GIS: a Case Study of Coimbatore City**. Wseas Transactions on Environment and Development. Department of Civil Engineering Avinashilingam University Tamil nadu, India, p. 107-119, 2012.

NTZIACHRISTOS, Leonidas et al. **Copert III -Computer Programme to calculate emissions from road transport, methodology and emission factors (version 2.1)**, European Energy Agency (EEA), Copenhagen, 2000.

NORSTAD, Inge et al. **Tramp ship routing and scheduling with speed optimization**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. v. 19, p. 853-865, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.05.001>

NOVAES, Antônio. **Sistemas de transportes – análise da demanda**. Volume 1, 160 p. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo,SP, 1988.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Nova Agenda Urbana**. 2017. Disponível em: < <http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Angola.pdf>>. Acesso em: abril, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Nível de gases de efeito estufa na atmosfera atinge novo recorde**. Disponível em: < <https://news.un.org/pt/story/2018/11/1648571>>. Acesso em: julho, 2021.

ORLOFF, Clifford. **A fundamental problem in vehicle routing**. Networks, v.4 p. 35-64, 1974. <https://doi.org/10.1002/net.3230040105>

PERES, Fernando; CASTELLI, Mauro. **Combinatorial optimization problems and metaheuristics: Review, challenges, design, and development**. Applied Sciences, v.11, p.1-39, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11146449>

PILLAC, Victor et al. **An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing**. Decision Support Systems, n.54, p. 414-423, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.06.007>

PRAJAPATI, Himanshu et al. **Prioritizing the solutions of reverse logistics implementation to mitigate its barriers: A hybrid modified SWARA and WASPAS approach**. J. Clean. Prod. Journal of Cleaner Production, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118219>

QGIS. Quantum Gis 3.4.6 La Coruña. **Software de geoprocessamento**. Disponível para download em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html>. Acesso em mar. 2021.

RADA, Elena et al. **Web-GIS oriented system viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transiente economies**. Waste Management. v.33, p. 785-792, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.002>

RAUNIVAR, Amit et al. **Multi-factorial evolutionary algorithm based novel solution approach for multi-objective pollution-routing problem**. Computers & Industrial Engineering, v.13, p.757-771, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.031>

REINA, Caio. **Roteirização de veículos com janelas de tempo utilizando algoritmo genético**. Dissertação de mestrado, p. 106. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2012.

ROESS, Roger et al. **Traffic engineering**. 3. ed. New Jersey, USA: PrenticeHall, 2004.

SAATY, Thomas. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, USA, 1980. <https://doi.org/10.21236/ADA214804>

_____. **The Analytic Hierarchy Process** —What It Is and How It Is Used. Mathematical Modelling, v. 9, p. 161-176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

_____. **Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process**. The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Managing Forest Ecosystems, v 3. Springer, Dordrecht, NL, 2001. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2

SALLEM, Rim et al. **Optimal routing of household waste collection using ArcGIS application: a case study of El Bousten district, Sfax city, Tunisia**. Arabian Journal of Geosciences. V. 14, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07265-2>

SANTINI, Alberto. **An adaptive large neighbourhood search algorithm for the orienteering problem**. Expert Systems with Applications, v. 123, p. 154–167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.050>

SANTOS, Teresa et al. **Assessing Sustainable Urban Development Trends in a Dynamic Tourist Coastal Area Using 3D Spatial Indicators**. Smart cities and Urban Management, v. 14, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14165044>

SATHISH, T; JAYAPRAKASH, Jeyaraju. **Multi Period Disassembly-to-Order of End of Life Product based on scheduling to maximize the Profit in Reverse Logistic Operation**. FME Transactions, 2017. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.081967>

SATRIA, Romi; CASTRO, Maria. **GIS tools for analyzing accidents and road design:a review**. Transportation Research Procedia, v. 18, p. 242–247, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.033>

SBIHI, Abdelkade; EGGLESE, Richard. **Combinatorial optimization and Green Logistics**. Ann Oper Res, v. 175, p.159–175, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0651-z>

SCHOENAU, Manuela.; MÜLLER, Martin. **What affects our urban travel behavior? A GPS-based evaluation of internal and external determinants of sustainable mobility in Stuttgart (Germany)**. Transportation Research Part F, v.48, p. 61-73, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.05.004>

SCHRIJVER, Alexander. **Theory of linear and Integer Programming**. WileyInterscience Series in Discrete Mathematics. John Wiley, Chichester, USA, 1986.

SHERAFAT, Hassan. **Algoritmos Heurísticos de Cobertura de Arcos**. Tese de doutorado, UFSC, PPGEP, Florianópolis, SC, Brasil, 2004.

SHRIVASTAVA, Priyanka et al. **A Review of Solid Waste Management Techniques Using GIS and Other Technologies**. International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), p. 1456-1459, 2015. <https://doi.org/10.1109/CICN.2015.281>

SILVA, Anderson. **Uma abordagem heurística para o problema do carteiro chinês capacitado na coleta de lixo urbano**. Dissertação mestrado. p. 102. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. UFPE, Recife- PE, Brasil, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-062>

SINGH, Jagdeep et al. **Progress and challenges to the global waste management system**. Waste management & Research, v. 32, n. 9, p. 800-812, 2014. <https://doi.org/10.1177/0734242X14537868>

SOERENSEN, Arnold et al. **Efficiently solving very large-scale routing problems**. Computers & Operations Research. v. 107, p. 32–42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.006>

SOLÁ, Gil et al. **Understanding sustainable accessibility in urban planning: Themes of consensus, themes of tension**. Journal of Transport Geography, v. 70, n. January 2017, p. 1–10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.05.010>

STEENBRINK Peter. **Optimization of Transport Networks**, Ed. John Wiley & Sons. New Jersey, NJ, USA, 1974.

SUZUKI, Yoshinori. **A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v.16, ed.1, p.73-77, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.08.003>

TAVARES, Gilberto. et al. **Optimisation of msw collection routes for minimum fuel consumption using 3d gis modelling**. Waste Management, v.29, ed. 3, p. 1176-1185, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013>

TIANHENG, Feng.et al. **A Supervisory Control Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Based on Energy Demand Prediction and Route Preview**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 64, p. 1691-1700, 2015. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2336378>

TIRKOLAEI, Erfan et al. **Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using pareto-based algorithms.** Journal of Cleaner Production, v. 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122927>

UCHOA, Eduardo et al. **New benchmark instances for the Capacitated Vehicle Routing Problem.** European Journal of Operational Research. V. 257, p. 845-858, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.012>

VIDAL, Thibaut et al. **Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis.** European Journal of Operational Research. v. 231, p. 1-21, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.053>

VIDAL, Thibaut et al. **A unified solution framework for multi-attribute vehicle routing problems.** European Journal of Operational Research, v. 234, p. 658-673, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.045>

VIEIRA, Heloísa. **Metaheurística para a Solução de Problemas de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo.** Dissertação de mestrado, p. 120. Departamento de Matemática aplicada. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas-SP, 2013.

XIAO, Yiyong et al. **The continuous pollution routing problem.** Applied Mathematics and Computation, p. 125, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125072>

WEBER, Eleonore et al. **Considerações e procedimentos para o processamento do balanço de energia no software GRASS GIS 7.4.0: um estudo no município de Floresta (Pernambuco –Brasil).** Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto. V. 1, n.1, p. 51-65, 2020.

WILSON, Robin; WATKINS, John. **Graphs – An Introductory Approach.** John Wiley & Sons. NJ, USA, 1990.

WRIGHT, Paul et al. **Transportation engineering: planning and design.** New York: John Wiley & Sons, 4. ed., p. 690.

ZHAO, Chunhong et al. **Characterizing the 3-D urban morphology transformation to understand urban-form dynamics: A case study of Austin, Texas, USA.** Landscape and Urban Planning. V. 203, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103881>