

Amanda Gonçalves Bernardes

Orientador: Patricia Medyna Lauritzen de Lucena Drumond

**Abordagem de Pesquisa Operacional aplicada
na Otimização de Rotas de Coleta de Lixo
Hospitalar na cidade de Picos - PI**

Picos - PI
Novembro - 2018

Amanda Gonçalves Bernardes

Orientador: Patricia Medyna Lauritzen de Lucena Drumond

**Abordagem de Pesquisa Operacional aplicada na
Otimização de Rotas de Coleta de Lixo Hospitalar na
cidade de Picos - PI**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal do Piauí, Campus Senador Helvídio Nunes de Barros, no ano de 2018 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação. Orientadora: Prof^a. Ma. Patricia Medyna Lauritzen de Lucena Drumond.

Universidade Federal do Piauí
Campus Senador Helvídio Nunes de Barros
Bacharelado em Sistemas de Informação

Picos - PI
Novembro - 2018

FICHA CATALOGRÁFICA
Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí
Biblioteca José Albano de Macêdo

B522a Bernardes, Amanda Gonçalves

Abordagem de pesquisa operacional aplicada na otimização de rotas de coleta de lixo hospitalar na cidade de Picos – PI / Amanda Gonçalves Bernardes.– 2018.

CD-ROM : il.; 4 ¾ pol. (53 f.)

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Bacharelado em Sistemas de Informação) – Universidade Federal do Piauí, Picos, 2018.

Orientador(A): Prof.^a Ma. Patricia Medyna Lauritzen de Lucena

1. Descartes de Lixo Eletrônico. 2. Meio Ambiente-Lixo Eletrônico. 3. Aplicação *Web*. I. Título.

CDD 628.42

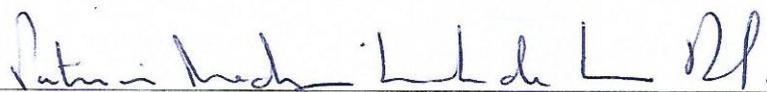
ABORDAGEM DE PESQUISA OPERACIONAL APLICADA NA OTIMIZAÇÃO DE
ROTAS DE COLETA DE LIXO HOSPITALAR NA CIDADE DE PICOS – PI

AMANDA GONÇALVES BERNARDES

Monografia aprovada como exigência parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Sistemas de Informação.

Data de Aprovação

Picos – PI, 27 de novembro de 2018



Prof. Ma. Patrícia Medyna Lauritzen de Lucena Drumond
Orientadora



Prof. Me. Leonardo Pereira de Sousa
Membro



Prof. Dr. Antônio Oseas de Carvalho Filho
Membro

Agradecimentos

Considerando que nenhum trabalho é uma realização individual, fica aqui registrado meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que direta, ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à Deus por estar presente e me guiar nas situações mais difíceis, iluminando e dando forças nos momentos obscuros e de desânimo.

Aos meus pais Joaquim (*in memoriam*) e Estael por tudo que sou, pelos valiosos ensinamentos que guardo e pratico com grande carinho e consideração e que me permitem trilhar meu próprio caminho. Aos meus irmãos, pela confiança que sempre depositaram em mim e que me encoraja a lutar por meus objetivos.

À minha filha Ana Alice, que é um presente de Deus. Vinda para me dar uma sorriso e um abraço quando não se tinha mais forças para enfrentar os obstáculos dessa jornada.

Agradeço à todos os professores que contribuíram com minha formação, em especial a professora Patrícia Medyna, por confiar-me a oportunidade de ser orientada. Obrigada pelo empenho e dedicação durante a orientação e ainda pelo exemplo que me deixou, não só como professora com elevadas qualidades intelectuais e morais, mas também como mulher.

Agradeço também à UFPI, por possibilitar o acesso ao ensino superior, onde obtive conhecimento, experiências para a vida e o principal: construí amizades. É muito gratificante quando você percebe que tem alguém pra te ajudar, para estar ao seu lado nos mais diversos momentos. Obrigada.

*Felizes são aqueles que se perdoam pelos erros e
aceitam como única alternativa, fazer o melhor da próxima vez.*
(@terradosbudas)

Resumo

A produção de lixo cresce consideravelmente de acordo com a expansão da população e crescimento da economia. Esse aumento é um problema para a saúde pública, especialmente no caso dos resíduos hospitalares, que devido a sua origem apresentam grande periculosidade de infecção ou contaminação. O lixo hospitalar requer tratamento diferenciado. Em função disso, o serviço público de coleta de resíduos hospitalares deve ser específico para essa finalidade. A coleta de lixo hospitalar da cidade de Picos é realizada de quarta à sábado. O veículo coletor percorre um determinado roteiro a partir de um ponto inicial, visitando todos os departamentos públicos de saúde previamente definidos para aquele dia, retornando ao ponto de partida. No entanto, a organização atual das rotas do veículo coletor e a preocupação com o correto descarte desses resíduos é um problema persistente. A demanda do município exige maior eficiência de tempo, custo e qualidade do serviço. O objetivo deste projeto foi otimizar as rotas de coleta de resíduos dos serviços de saúde no município de Picos, aplicando as heurísticas do Vizinho Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante para resolver o problema classificado como Problema do Caixeiro Viajante, que consiste em identificar o circuito de custo mínimo que inclui uma e uma só vez cada um dos vértices de um grafo. Os resultados obtidos através da metodologia proposta foram comparados com a rota empregada atualmente obtendo reduções 6,13% até 25,67% na distância percorrida. Por fim, foi analisado o custo entre as rotas encontradas, como fator relevante à tomada de decisão.

Palavras-chaves: Otimização de Rotas, Problema do Caixeiro Viajante, Coleta de Lixo Hospitalar.

Abstract

The production of garbage increases considerably according to the population expansion and growth of the economy. This is a problem for public health, especially in the case of hospital waste, which is due to its high presence of dangerousness of infection or contamination. Hospital waste requires differential treatment. Because of this, the public hospital data collection service should be specific for this purpose. The garbage collection hospital in the city of Picos is held from Wednesday to Saturday. The collector vehicle traverses a given rotor from a starting point, visiting all health departments previously defined for that day, returning to the starting point. However, the current organization of collector vehicle routes and a concern about the problem of disposing of waste is a persistent problem. The demand of the municipality requires greater efficiency of time, cost and quality of service. The next project is to optimize the waste collection routes of the health services in the municipality of Picos, applying the Neighboring Neighbor's Heuristics and the Insertion of the Most Distortion to solve the problem of the Traveling Clerk, which consists of identifying the minimum cost circuit which serves once and for each of the vertices of a graph. The obtained results were compared with the technique currently used, obtaining reductions of 6,13 % up to 25,67 % in the course. Finally, the cost between the sessions and the relevant data for decision making was analyzed.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Gráfico de custo/Kg de Lixo Coletado na Região Nordeste (2016). . . .	16
Figura 2 – Matriz de Pesos.	17
Figura 3 – Exemplo de Grafo	18
Figura 4 – (a) Mapa das 7 pontes de Königsberg (1736); (b) Representação Gráfica de Euler.	19
Figura 5 – Uma solução do jogo de Hamilton.	19
Figura 6 – Pseudocódigo VMP	22
Figura 7 – Pseudocódigo IMD	23
Figura 8 – Algoritmo de Teitz e Bart	24
Figura 9 – Designação de Gillet e Johnson Modificado	25
Figura 10 –Pontos de Coleta Semanal	30
Figura 11 –Pontos de Coleta Quinzenal	30
Figura 12 –Reagrupamento da Coleta Semanal	33
Figura 13 –Roteiro Proposto (Quarta - Feira)	35
Figura 14 –Roteiro Proposto (Quinta - Feira)	36
Figura 15 –Roteiro Proposto (Sexta - Feira)	36
Figura 16 –Roteiro Proposto (Quinzenal (2))	36
Figura 17 –Gráfico Comparativo dos Resultados Obtidos pelas Heurísticas	38
Figura 18 –Gráfico Percentual da Redução Obtida pela Otimização	39
Figura 19 –Gráfico da Redução obtida pela Heurística IMD por Rota	40
Figura 20 –Modelo de arquivo XML	48
Figura 21 –Matriz Todos os Pontos de Coleta Semanal - Parte 1	50
Figura 22 –Matriz Todos os Pontos de Coleta Semanal - Parte 2	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados	27
Tabela 2 – Custo da Rota Atual	31
Tabela 3 – Roteirização Semanal (Clusterização Original)	34
Tabela 4 – Roteirização Semanal (Clusterização Proposta)	35
Tabela 5 – Estabelecimentos de Coleta Semanal	49
Tabela 6 – Estabelecimentos de Coleta Quinzenal	49
Tabela 7 – Reagrupamento de <i>Clusters</i>	52
Tabela 8 – Resultados Obtidos para Rota Quinzenal (1)	53

Lista de abreviaturas e siglas

API	<i>Application Programming Interface</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CAPS	Centro de Atenção Psico-Social
CAPS AD	Centro de Atenção Psico-Social Álcool e outras Drogas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTA	Centro de Testagem e Aconselhamento
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IMD	Inserção do Mais Distante
Km	Quilômetros
Kg	Quilogramas
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PL	Programação Linear
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
RSS	Resíduos Sólidos de Saúde
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
UBS	Unidade Básica de Saúde
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
VMP	Vizinho Mais Próximo
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
W3C	<i>World Wide Web Consortium</i>
ZR	Zona Rural

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivos	14
2	Referencial Teórico	15
2.1	Resíduos Sólidos	15
2.2	Coleta de Lixo Hospitalar	15
2.3	Roteirização	16
2.3.1	Grafos	17
2.3.2	Teoria dos Grafos	18
2.4	Problema do Caixeiro Viajante (TSP - <i>Traveling Salesman Problem</i>)	20
2.4.1	Complexidade do PCV	20
2.5	Métodos de Resolução do PCV	21
2.5.1	Heurística do Vizinho Mais Próximo	22
2.5.2	Heurística de Inserção do Mais Distante	22
2.6	Problemas de Localização	23
2.6.1	Problema de P-medianas	23
2.6.2	Heurística de Teitz e Bart	23
2.6.3	Designação de Gillet e Johnson Modificado	24
3	Trabalhos Relacionados	26
4	Otimização de Rotas de Coleta de Lixo Hospitalar na cidade de Picos - PI	28
4.1	Características do Problema	28
4.1.1	Coleta de Dados	29
4.1.2	Rota Atual	29
4.1.3	Custo Atual	31
4.1.4	Frota Coletora	31
4.1.5	Custo de Combustível	31
4.2	Otimização da Coleta	32
4.2.1	Reagrupamento dos <i>Clusters</i> Semanais	32
4.2.2	Criação das Novas Rotas	33
4.3	Análise dos Resultados	38
5	Conclusão	41
5.1	Trabalhos Futuros	41
	Referências	43

Apêndices	46
APÊNDICE A <i>Distance Matrix API</i>	47
APÊNDICE B Identificação dos Pontos de Coleta e Rota Atual	49
APÊNDICE C Matriz de Coleta Semanal	50
APÊNDICE D Reagrupamento de <i>Clusters</i>	52
APÊNDICE E Rota Quinzenal (1)	53

1 Introdução

O desenvolvimento acelerado da população e o conseqüente aumento de consumo impactam diretamente na quantidade de lixo produzido, o que constitui atualmente um grande desafio enfrentado pelas administrações públicas. Segundo a pesquisa da [ABRELPE \(2016\)](#), são coletados mais de 67 mil toneladas de lixo todos os dias, das mais diversas fontes, somente na região nordeste.

A produção de lixo abrange alguns fatores, tais como: geração, coleta, processamento e destinação final. Segundo [Meireles \(2009\)](#), aproximadamente dois terços do orçamento público para gerência do lixo é gasto com a coleta e transporte do mesmo. As principais categorias de coleta são as de resíduos provenientes de construções ou demolição, domiciliar, industrial, hospitalar e seletiva. Do investimento total na coleta, aproximadamente 3% são destinados ao recolhimento de resíduos de serviço de saúde, que devido à alta periculosidade de contaminação e infecção necessitam de cuidados especiais e coleta específica.

Esta coleta consiste no recolhimento e transporte do lixo gerado por todos os estabelecimentos prestadores de serviços de saúde: hospitais, clínicas médicas e odontológicas, laboratórios de análises clínicas, ambulatórios, farmácias, instituições de ensino e pesquisa médica, clínicas veterinárias e unidades básicas de saúde (UBS). A administração municipal, de Picos especificamente, é encarregada pela coleta somente dos estabelecimentos públicos municipais, os demais devem se responsabilizar por destinar corretamente os resíduos de saúde por eles produzidos.

As técnicas de pesquisa operacional vêm sendo aplicadas nas mais diversas áreas, com intuito de otimizar ou melhorar performances, como por exemplo, os modelos de otimização em redes que são utilizados para resolver problemas de redes de transporte, de roteamento, de energia, de distribuição, de gerenciamento de recursos, de planejamento financeiro, dentre outros.

Alguns trabalhos presentes na literatura, fazem o estudo de casos reais onde rotas são traçadas a partir de conhecimentos empíricos. Com propósito de minimizar custos de operação, utilizam o modelo de otimização do Problema do Caixeiro Viajante (PCV) para encontrar a melhor rota, ([MORO et al., 2015](#)), ([ALVES, 2015](#)), ([LAGO; TURCI, 2015](#)), ([REIS et al., 2016](#)), ([PINHEIRO et al., 2017](#)) da coleta de resíduos ([SCHOROEDER; JESUS, 2013](#)). Os resultados obtidos foram satisfatórios e variam entre 8,5% e 20% de redução na distância percorrida.

Cada heurística utilizada pode apresentar um resultado diferente e em alguns problemas é interessante aplicar mais de uma em sua resolução, a fim de que seja possível avaliar as soluções obtidas e compará-las, para determinar se houveram benefícios.

Neste trabalho é realizada a otimização da rota de coleta de lixo hospitalar, na cidade

de Picos, localizada na região centro-sul do Piauí. A coleta é feita de segunda à sexta na zona urbana e aos sábados na zona rural. São no total 50 pontos de coleta distribuídos em 3 rotas diferentes. As heurísticas de Inserção do Mais Distante (IMD) e do Vizinho Mais Próximo (VMP) foram utilizadas em razão de comparação dos resultados na resolução do Problema do Caixeiro Viajante.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a otimização da rota dos veículos coletores de lixo hospitalar, utilizando técnicas de pesquisa operacional para minimizar custos, levando em consideração o tempo e a distância percorrida pelos veículos.

Objetivos específicos:

1. Melhorar as rotas atualmente empregadas pela empresa coletora de lixo hospitalar na cidade de Picos – Piauí, visando reduzir os custos com a coleta.
2. Identificar, desenvolver e comparar metodologias que resolvam o problema de otimização de cobertura de vértices através da resolução do Problema do Caixeiro Viajante;
3. Implementar e aplicar algoritmos heurísticos de construção de rota a partir da metodologia adotada.
4. Comparar os resultados obtidos pela otimização em relação ao aplicado atualmente pela empresa coletora.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 aborda-se o referencial teórico com os conceitos necessários para melhor compreensão do trabalho. No Capítulo 3, tem-se uma breve apresentação de trabalhos recentes da literatura que são relacionados com este. A caracterização do problema estudado, o detalhamento da resolução e os resultados obtidos são descritos no Capítulo 4 e por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 5.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo são abordados conceitos básicos que servem de referencial teórico a respeito da coleta de lixo hospitalar, do problema de roteirização de veículos e dos principais métodos utilizados para a sua resolução.

2.1 Resíduos Sólidos

Resíduos sólidos, também conhecidos como lixo, são todos os restos sólidos descartados por seres humanos e que apesar de não apresentar utilidade para determinado fim pode ser utilizado para outro fim.

Um mau gerenciamento dos resíduos sólidos, além de acarretar gastos financeiros significativos, pode provocar graves danos ao meio ambiente, comprometendo a saúde e o bem-estar da população. O assunto tem se tornado tópico de debates em diversas áreas do conhecimento e sua crescente importância, deve-se a três fatores principais, segundo dados da [ABRELPE \(2017\)](#):

- Grande quantidade de lixo gerada: 1,035 (kg/hab/dia);
- Gastos financeiros relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: R\$ 10.145 milhões/ano;
- Impactos ao meio ambiente e à saúde da população.

A [ABNT \(2004\)](#) define resíduos sólidos como os resíduos resultantes da comunidade e são classificados de acordo com sua origem: industrial, comercial, residencial, hospitalar, agrícola, de serviços e de varrição.

2.2 Coleta de Lixo Hospitalar

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamentam o controle de processos desde a segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento até a disposição final de resíduos sólidos, estabelecendo procedimentos operacionais, em função dos riscos envolvidos, e critérios para o licenciamento ambiental dos sistemas de tratamento e destinação final .

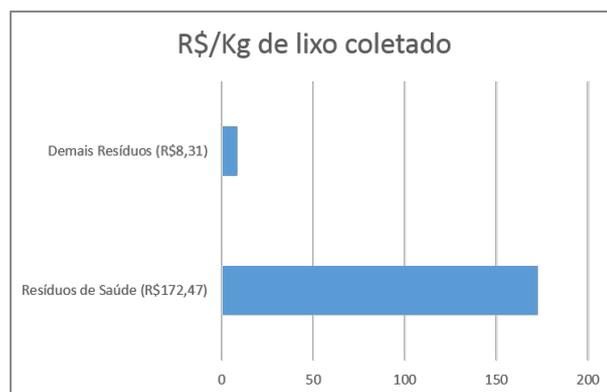
O conceito de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) é mais amplo do que o conhecido “lixo hospitalar”. A Resolução nº 358 do CONAMA, de 2005 define como:

Serviços relacionados com o atendimento à saúde humana ou animal, inclusive os serviços de assistência domiciliar e de trabalhos de campo; laboratórios analíticos de produtos para saúde; necrotérios, funerárias e

serviços onde se realizem atividades de embalsamamento (tanatopraxia e somatoconservação); serviços de medicina legal; drogarias e farmácias inclusive as de manipulação; estabelecimentos de ensino e pesquisa na área de saúde; centros de controle de zoonoses; distribuidores de produtos farmacêuticos; importadores, distribuidores e produtores de materiais e controles para diagnóstico in vitro; unidades móveis de atendimento à saúde; serviços de acupuntura; serviços de tatuagem, entre outros similares (BRASIL, 2005).

A quantidade gerada de resíduos de serviços de saúde é a primeira vista irrelevante, por somar aproximadamente apenas 2% do total de resíduos recolhidos (BRASIL, 2006). No entanto, pelo potencial de risco que representam à saúde e ao meio ambiente tornam-se parte significativa nos custos com a coleta. Ao analisar o gráfico da Figura 1, pode-se constatar que a coleta apropriada do lixo hospitalar pode custar vinte vezes mais do que a coleta do lixo comum, segundo os dados da pesquisa do ABRELPE (2016).

Figura 1 – Gráfico de custo/Kg de Lixo Coletado na Região Nordeste (2016).



De acordo com o princípio da responsabilidade compartilhada, a obrigação da coleta deixa de ser somente do gerador estendendo-se ao poder público e às empresas de coleta, tratamento e disposição final Brasil (2006). No entanto, especificamente na cidade de Picos, a administração municipal é encarregada pela coleta dos RSS somente dos estabelecimentos públicos, os demais possuem contrato com uma empresa para a coleta e gerenciamento desses resíduos.

2.3 Roteirização

O problema da coleta do lixo é um problema clássico de otimização que envolve roteirização e pode ser modelado pelo Problema do Caixeiro Viajante. Os problemas de roteamento encontram um suporte científico na Teoria dos Grafos. Desta forma, faz-se necessária a apresentação de algumas definições para entender o problema abordado nesta pesquisa.

2.3.1 Grafos

Grafos são objetos de estudo em matemática discreta e podem ser definidos como um par ordenado $G = (V, E)$, onde V é um conjunto de vértices e E o conjunto de arestas (REGO, 2015).

Grafos são um conjunto de vértices, conectados por arestas, que podem representar diversos tipos de conexões que mantêm relações entre si, como por exemplo: um conjunto de cidades (vértices) e um conjunto de estradas que ligam essas cidades diretamente (arestas). Aplicações de grafos são utilizadas em redes de computadores, redes sociais, relações de parentesco, circuitos elétricos.

Na literatura atual, existem diversas maneiras de representar um grafo. São brevemente retratadas aqui as duas representações mais utilizadas: Um grafo $G = (V, E)$ pode ser representado graficamente da seguinte maneira: cada nó é representado por um círculo, e cada aresta por uma linha conectando os dois círculos (ARENALES et al., 2017). Outro meio de representar grafos é através de matrizes, as mais utilizadas são as matrizes de pesos, incidência e adjacência.

Um vértice é dito adjacente quando há conexão entre dois vértices por uma aresta ($e_i = v_i v_j$), inserindo valor 1 na matriz de adjacência, caso contrário 0. A matriz de incidência representa a ligação entre uma aresta e_i com os vértices ($v_i, v_j \dots v_n$) que ela liga. A matriz de pesos (Figura 2) é utilizada para representar grafos valorados¹, esta é preenchida com o peso da aresta que liga dois vértices, quando essa existir ou será atribuído valor 0, quando não existir.

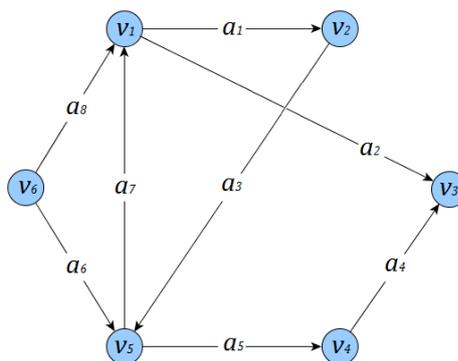
Figura 2 – Matriz de Pesos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0	183	119	272	259	241	88	292	657
2	387	0	357	362	491	418	320	533	725
3	240	263	0	343	353	334	182	307	758
4	306	283	292	0	309	276	201	427	605
5	272	419	331	308	0	137	176	198	386
6	269	349	297	295	137	0	159	207	535
7	107	243	155	211	171	153	0	226	569
8	73	256	192	346	332	314	162	0	733
9	666	826	805	680	457	611	650	592	0

Gracioli et al. (1994) diferencia arcos e arestas pelo fato de um possuir orientação (usualmente representada por uma seta) e o outro não, respectivamente. A partir desta definição pode-se resumidamente apresentar a classificação dos grafos quanto ao seu tipo. Afonso (2012) define um grafo $G = (V, E \cup A)$, em que V é o conjunto de vértices, A é o conjunto dos arcos e E é o conjunto de arestas. Este grafo pode ser classificado como não orientado ($A = \emptyset$), orientado ($E = \emptyset$) ou misto. Na Figura 3, observa-se a representação gráfica de um grafo valorado e orientado.

¹ Um grafo $G (V, E)$ é dito valorado quando existe uma ou mais funções relacionando V e/ou E com

Figura 3 – Exemplo de Grafo



Fonte: (PINHEIRO et al., 2017)

Em um grafo orientado cada arco a_{ij} possui um sentido da origem i para o destino j , onde é possível ir do nó i para o nó j , mas o contrário não. Este é dito ponderado ou valorado quando possui custo ou distância de se percorrer a aresta que liga dois vértices atribuídos aos seus arcos (pesos).

Um grafo G é considerado completo se para cada par de vértice $(v_i v_j)$ existir pelo menos uma aresta a_{ij} associada. Em relação a sua simetria, é tido como simétrico se a distância direta de i para j for igual a de j para i , para cada par de vértices i, j , caso o contrário o problema é assimétrico. Vale ressaltar que o problema resolvido neste trabalho é completo e assimétrico, pois todos os pontos possuem caminhos possíveis entre si, onde a distância de um ponto a até um ponto b pode ser diferente da distância de b até a , devido à diversos fatores, como por exemplo o sentido de circulação das vias.

2.3.2 Teoria dos Grafos

A Teoria dos Grafos surgiu no século XVIII, quando o matemático suíço, Leonhard Euler foi questionado se existia a possibilidade de atravessar as 7 pontes que cruzavam o rio Pregel ligando Königsberg com suas duas ilhas, de modo a passar uma única vez por cada ponte e voltar ao ponto de partida. A Figura 4, mostra o mapa das pontes (a) e a representação gráfica (b) das sete pontes (através das arestas), e as duas ilhas juntamente com as margens do rio (vértices).

Euler provou que era impossível realizar um ciclo (ou circuito, se o grafo for orientado) que incluía todas as arestas do grafo, uma e uma só vez, designado ciclo Euleriano. Ao demonstrar o teorema que herdou o nome do matemático, Euler concluiu que existe ciclo Euleriano em grafo não orientado, se e só se os vértices tiverem grau² par.

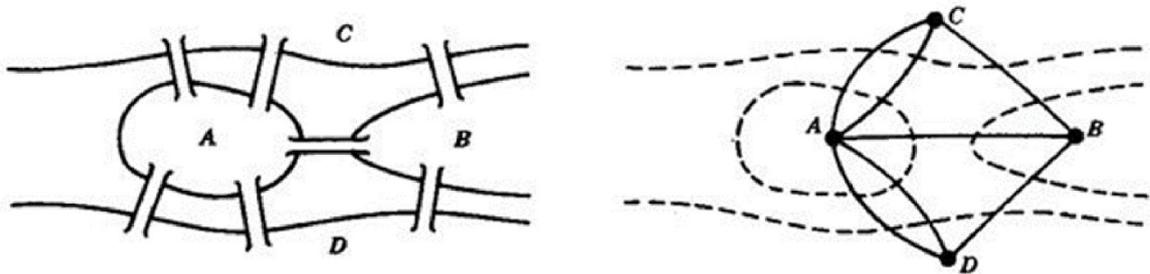
Em 1857, o matemático irlandês Willian Hamilton estudou um problema semelhante ao questionamento de Euler, ao propor um jogo, que denominou “*Around the World*”. O

um conjunto de números.

² De acordo com Bilber et al. (2013), o grau de um vértice é o número de arestas que incidem nele.

Figura 4 –

(a) Mapa das 7 pontes de Königsberg (1736); (b) Representação Gráfica de Euler.

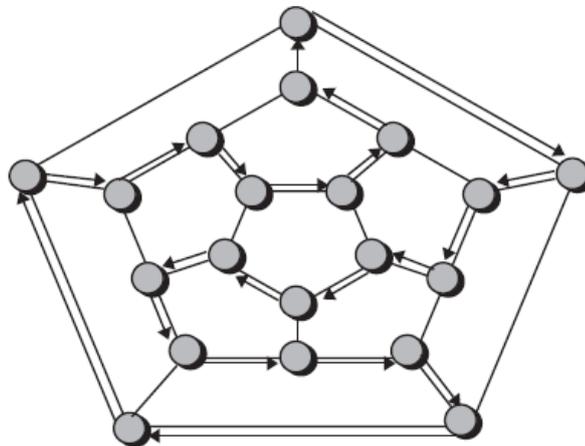


Fonte: (REGO, 2015)

mesmo era praticado sobre um dodecaedro em que cada vértice estava associado a uma cidade.

Segundo Goldbarg e Luna (2005), o desafio consistia em encontrar uma rota através dos vértices que iniciasse e terminasse em uma mesma cidade sem nunca repetir uma visita. Em sua homenagem, os ciclos que solucionam o jogo passaram a se denominar ciclo hamiltoniano. Uma das soluções do jogo está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Uma solução do jogo de Hamilton.



Fonte: (GOLDBARG; LUNA, 2005)

Os conceitos de circuitos de Euler e ciclos de Hamilton são similares naquilo que proíbem voltar a utilizar: nos circuitos de Euler as arestas, nos ciclos de Hamilton os vértices. No entanto, é muito mais difícil determinar quais são os grafos conexos³ que admitem um ciclo de Hamilton do que determinar os grafos conexos que admitem um circuito de Euler (BILBER et al., 2013).

³ Um grafo é considerado conexo se existir um caminho entre qualquer par de vértices. (BILBER et al., 2013)

2.4 Problema do Caixeiro Viajante (TSP - *Traveling Salesman Problem*)

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um problema de otimização baseado na cobertura dos vértices, onde a cada arco é atribuído um valor que pode representar a distância, o tempo ou o custo da viagem de um vértice para outro, e tem como propósito a determinação dos possíveis caminhos hamiltonianos em um grafo qualquer, com objetivo final de encontrar o caminho de menor custo.

O problema do Caixeiro-Viajante (Traveling Salesman Problem – TSP) é um problema bastante conhecido e estudado na área da pesquisa operacional. Este problema é constituído por um determinado número de cidades, onde o objetivo passa por minimizar a distância percorrida para que o caixeiro-viajante visite todas as cidades apenas uma vez e que no final volte à cidade inicial. Apesar de parecer um problema simples, é extremamente complicado encontrar a sua solução óptima, por isso é que este problema é bastante estudado na investigação operacional, sendo que para chegar à sua solução final poderá recorrer-se a diversas técnicas (MAGALHÃES, 2011).

Apesar da sua formulação simples, continua a captar a atenção e o interesse de muitos investigadores das mais diversas áreas, entre as quais Matemática, Investigação Operacional, Física e Biologia (GOMES, 2008). Sua importância deve-se a pelo menos três características. Segundo Kripka e Selong (2009): uma enorme relação com outros modelos, grande dificuldade de solução exata e grande aplicação prática observada em muitas áreas como manufatura flexível, sistemas de transportes, problemas de roteamento e comunicação de dados.

Os problemas pequenos podem ser solucionados de forma ótima ao traçar todas as rotas possíveis, calculando o comprimento de cada uma delas, para então encontrar o menor caminho. Deste modo, reduzindo o problema de otimização a um problema de enumeração. Entretanto, a praticidade do método reducionista torna-se impraticável para problemas muito grandes, devido a presença de um fatorial na medida do esforço computacional.

2.4.1 Complexidade do PCV

A dificuldade de encontrar uma solução ótima deve-se ao fato de que o tempo necessário para resolução deste problema cresce exponencialmente com o número de nós a serem visitados. De acordo com Kripka e Selong (2009), “pode-se dizer que o problema do caixeiro viajante é um problema NP-difícil, ou seja, possui ordem de resolução de complexidade não polinomial”.

O problema do caixeiro viajante consiste em se determinar um caminho de menor custo para visitar n cidades interligadas, iniciando e terminando o percurso em uma mesma cidade. A partir da cidade inicial a segunda deverá ser escolhida entre as cidades restantes ($n-1$), a próxima de um conjunto das cidades restantes ($n-2$) e assim por diante...

Desta forma, pode-se concluir, através de um raciocínio combinatorial simples e clássico, que o conjunto de rotas possíveis possui cardinalidade dada por: $(n-1) * (n-2) * (n-3) * \dots * 2 * 1$ ou seja, o caixeiro deve escolher sua menor rota de um conjunto de $(n-1)!$ possibilidades. Por exemplo, para um pequeno problema com apenas 20 cidades, o número de rotas possíveis seria $19!$, ou seja, 121645100408832000 caminhos possíveis (RAMOS et al., 2001).

A estratégia descrita acima de enumerar todas as soluções possíveis e determinar a de menor custo, é aparentemente a maneira mais simples de resolver tal problema. Assim, como dito antes, devido à sua ordem de complexidade não é possível encontrar a solução ótima em tempo polinomial para problemas muito grandes.

2.5 Métodos de Resolução do PCV

Os métodos utilizados para resolver o Problema do Caixeiro Viajante estão divididos em dois grupos: os métodos exatos e os métodos heurísticos. Devido à sua complexidade, os tempos para otimizar rotas com vários vértices por algoritmos exatos são inviáveis, a opção nesses casos seria o uso de heurísticas.

As heurísticas ou algoritmos heurísticos, apesar de não garantir encontrar uma solução ótima, permitem a obtenção de soluções de forma aproximada, porém com maior rapidez, normalmente se baseiam em uma abordagem intuitiva, que assume a estrutura particular de um problema de forma inteligente (ALVES, 2015).

Raff (1983) apresenta as heurísticas de construção de rotas para gerar um circuito viável a partir de um conjunto inicial de vértices, utilizando algum critério de escolha que modifica esse conjunto a cada iteração. Como exemplo, tem-se as seguintes técnicas de construção de rotas:

- Heurística do Vizinho Mais Próximo
- Inserção do Mais Próximo
- Inserção do Mais Distante
- Inserção Mais Rápida

Além de outras, tais como Inserção do Mais Barato, Inserção Arbitrária, Cobertura Convexa, Inserção do Maior Ângulo (RAFF, 1983). Neste trabalho foram utilizadas as heurísticas do Vizinho Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante, que são apresentadas nas Subseções 2.5.1 e 2.5.2, respectivamente.

2.5.1 Heurística do Vizinho Mais Próximo

A heurística do Vizinho Mais Próximo (VMP), utiliza uma matriz para definir a distância entre os pontos. Pode-se dizer que é a heurística mais intuitiva para o PCV, pois como o nome sugere, a rota é construída pela escolha do vértice mais próximo (de menor custo de deslocamento), sempre que o caixeiro se desloque, até que todas as cidades sejam visitadas.

Define-se o ponto de partida v_i , e a partir desse ponto encontra-se o vizinho mais próximo v_j , de forma que a distância entre i e j seja a mínima. O nó mais próximo encontrado será inserido no final do caminho e a operação se repete até que todos os nós tenham sido visitados, de maneira que não é permitido visitar um nó duas vezes e nem alterar sua posição depois de inserido no caminho. O ciclo é fechado ligando o último nó visitado ao nó inicial (RAFF, 1983) (AGOSTINI, 2015).

A Figura 6 apresenta o pseudocódigo da Heurística do Vizinho Mais Próximo:

Figura 6 – Pseudocódigo VMP

Procedimento
1. Inicie o caminho contendo apenas o nó inicial i ;
2. Encontre o nó k , não pertencente ao caminho, mais próximo do último nó adicionado;
3. Adicione k no fim do caminho;
4. Volte ao passo 2 e repita até que todos os nós sejam visitados;
5. Encerre o ciclo retornando ao nó inicial, formando um circuito Hamiltoniano.
FIM

2.5.2 Heurística de Inserção do Mais Distante

O algoritmo de Inserção do Mais Distante (IMD) em divergência à heurística do VMP, segundo Goldberg e Luna (2005), possui um processo de decisão mais elaborado dividido em três níveis: a escolha do vértice a ser inserido na solução; a posição de inserção desse novo vértice; e a decisão de um ciclo inicial.

Essa heurística parte de uma sub-rota inicial (um ciclo de comprimento 3) e vai selecionando e inserindo vértices ainda não incluídos na solução até completar um ciclo Hamiltoniano. Escolhido o vértice k mais distante de todos os vértices que já estão na rota, cabe decidir como ele será inserido. O local de inserção do vértice k na sub-rota é dada pelo par de vértices (i, j) que pertencem a sub-rota, ligando ao vértice k , tal que custo $(i, k) + \text{custo}(k, j) - \text{custo}(i, j)$, seja mínimo. Vale ressaltar que o tempo de computação envolvido, tanto no IMD como no VMP, é da ordem de n^2 (BENEVIDES, 2011). O pseudocódigo do algoritmo de Inserção do Mais Distante está representado na Figura 7:

Figura 7 – Pseudocódigo IMD

Procedimento
1. Inicie o caminho contendo apenas o nó i ;
2. Encontre o nó k tal que C_{ik} seja máxima e forme a rota $i - k - i$;
3. Dada a sub-rota, encontre o nó k não pertencente a sub-rota mais distante de qualquer nó da sub-rota;
4. Encontre o arco (i, j) na sub-rota que minimiza $C_{ik} + C_{kj} + C_{ij}$. Insira k entre i e j ;
5. Volte ao passo 3 até formar um circuito Hamiltoniano.
FIM

2.6 Problemas de Localização

A localização de facilidades é um aspecto crítico do planejamento estratégico de empresas privadas e públicas. Estes problemas, geralmente, têm como objetivo selecionar a melhor localização em uma determinada região para a facilidade (instalação) de serviços. Como por exemplo, a localização de centros de saúde, escolas, estações de bombeiros, depósitos e centros de distribuição (NETO, 2013). Os problemas de localização de facilidades, são amplamente classificados como o problema de medianas, que neste trabalho será utilizado para melhor distribuir o agrupamento dos pontos por dia de coleta.

2.6.1 Problema de P-medianas

Este problema consiste em determinar p pontos de medianas (ou sementes) entre n pontos de demanda, com $p < n$, de forma que a distância total percorrida entre os pontos de demanda e a mediana mais próxima seja a menor possível. Os algoritmos de localização de facilidades permitem a localização de p medianas, sendo p , neste caso, o número de dias da semana em que a rota é dividida.

É possível resolver este problema com programação linear, porém este, assim como o PCV, é considerado de alta complexidade, tornando inviável sua resolução por algoritmos exatos. Várias heurísticas foram desenvolvidas para fornecerem soluções de boa qualidade. Dentre estas, destaca-se o algoritmo heurístico das p -medianas de Teitz e Bart (1968) que é amplamente empregado na literatura para este fim, pois obtém soluções satisfatórias para problemas pequenos e é de fácil implementação computacional (TIBURCIO, 2012).

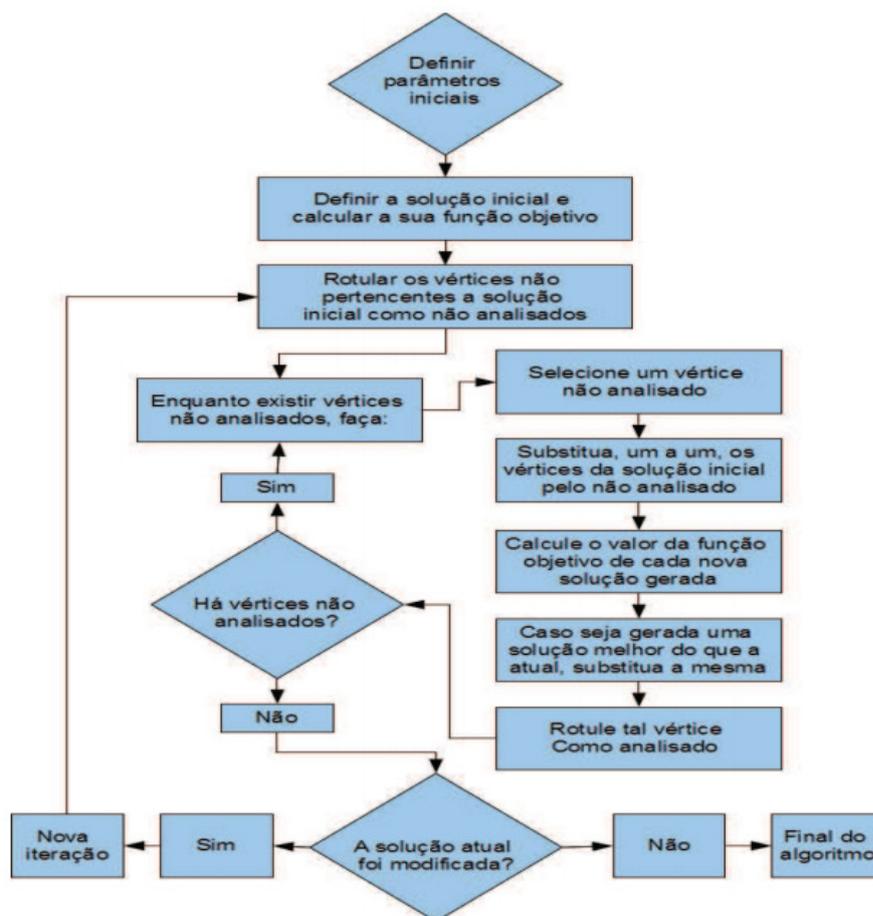
2.6.2 Heurística de Teitz e Bart

O método de resolução heurística para o problema das p -medianas, conhecido como algoritmo de Teitz e Bart, consiste em uma substituição dos vértices dos locais existentes em determinado problema. Com base numa solução inicial, é realizada uma substituição

entre os diversos vértices do problema, com o objetivo de melhorar o valor da função objetivo (soma das menores distâncias entre v_i e todos os demais $n - 1$ vértices) à medida que são realizadas as iterações de tal algoritmo. Este é finalizado quando o critério de parada pré-estabelecido para o algoritmo é obtido.

O algoritmo de Teitz e Bart pode ser estruturado conforme o fluxograma da Figura 8:

Figura 8 – Algoritmo de Teitz e Bart



Fonte: (NETO, 2013)

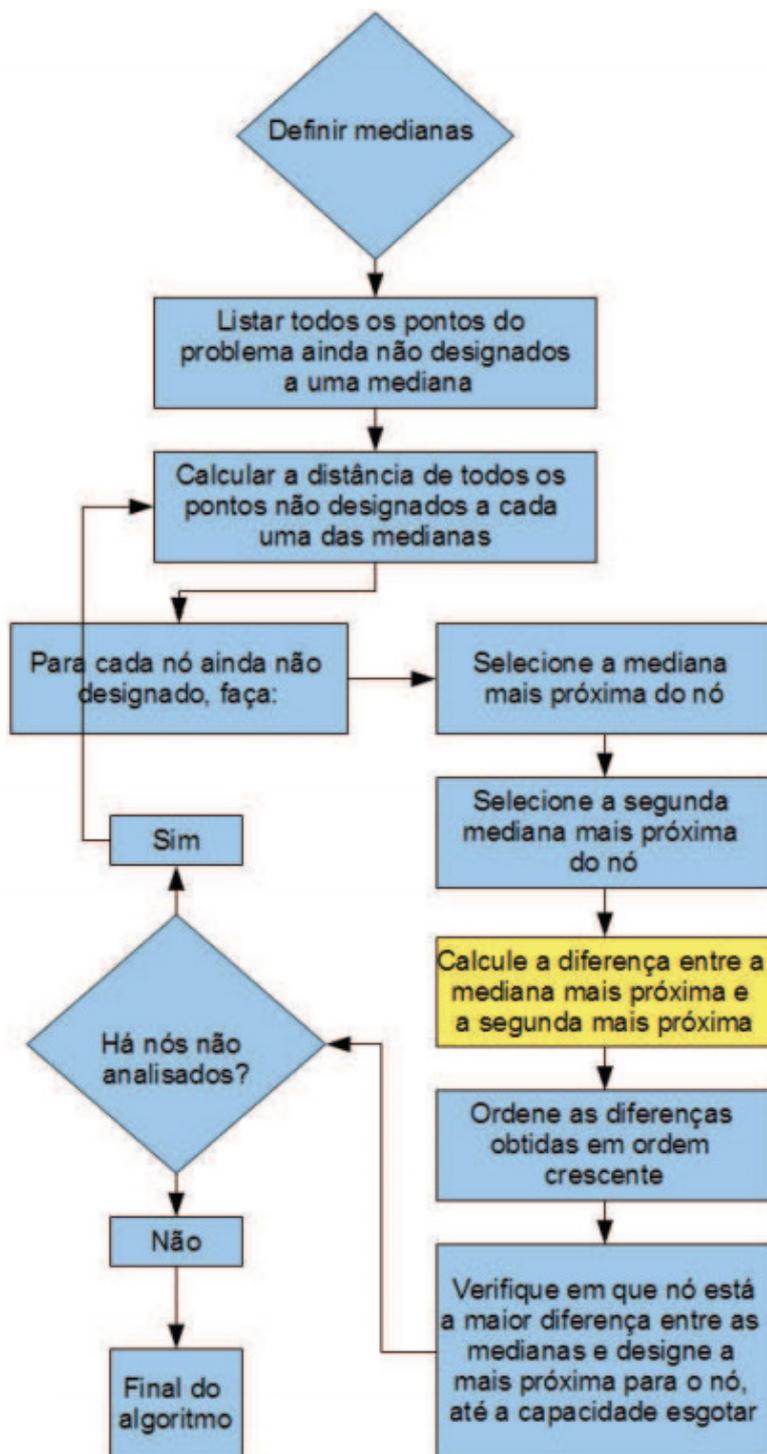
2.6.3 Designação de Gillet e Johnson Modificado

Os problemas de designação ou de alocação, consistem em designar a cada ponto de demanda à uma respectiva mediana, dentre as definidas pelo Algoritmo de Teitz e Bart, formando assim clusters para atendimento, que será feito através de uma otimização do problema do caixeiro viajante.

Segundo Corrêa (2000), o critério originalmente utilizado, pelo algoritmo de Gillet e Johnson, para definir a prioridade de designação é a razão entre a primeira e a segunda menor distância do ponto de demanda até a mediana. No algoritmo de Gillet e Johnson

modificado é utilizado o teste das diferenças, conforme apresentado no fluxograma da Figura 9:

Figura 9 – Designação de Gillet e Johnson Modificado



Fonte: (NETO, 2013)

3 Trabalhos Relacionados

Neste Capítulo são apresentados alguns trabalhos, entre artigos, dissertações e teses, relacionados à otimização de rotas, os quais são classificados de acordo com três aspectos: objetivo/contexto, modelo de problema abordado e método de resolução utilizado. Na Tabela 1 são apresentados de maneira sucinta os trabalhos mais relevantes relacionados a esta pesquisa, ordenados crescentemente por ano de publicação (de 2013 a 2017).

- **Objetivo:** de modo geral, todos os trabalhos têm objetivos similares, que é a otimização de uma determinada rota, visando encontrar o caminho mais curto, para economia de tempo e combustível, mudando somente o contexto, como está mais detalhado na Tabela 1.
- **Tipo de problema:** este tópico compara o modelo de problema de roteirização que foi abordado, podendo ser baseado na procura em arestas (caminho euleriano) ou nos vértices (ciclo hamiltonino), com ou sem restrições.

Os trabalhos selecionados abordam o problema com procura nos vértices, baseado no Problema do Caixeiro Viajante (PCV) (Silva et al. (2013); Schoroeder e Jesus (2013); Moro et al. (2015); Alves (2015); Reis et al. (2016);) ou em suas variáveis como no caso do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) que tem como restrição a capacidade do veículo (Hachicha et al. (2014); Vecchi et al. (2015a); Gilardino et al. (2017)).

- **Metodologia de Resolução:** este item evidencia os métodos utilizados por cada autor para resolver o problema proposto, os quais a partir da definição do modelo matemático, possuem grandes variedades de soluções, podendo ser utilizados métodos exatos, heurísticos ou meta-heurísticos.

A maioria dos problemas apresentados são solucionados através da comparação de duas ou mais heurísticas para encontrar a melhor rota, encontrando resultados satisfatórios. Na maioria dos casos de roteirização pode-se perceber a relevância do conhecimento empírico dos motoristas, que escolhem as rotas de acordo com sua experiência.

Alves (2015) e Pinheiro et al. (2017) utilizam heurísticas para encontrar a melhor rota e meta-heurísticas para aprimorar a rota encontrada. Inicialmente, estes são trabalhos que abordam maior número de clientes que devem ser visitados. Os problemas de PRV abordados por Hachicha et al. (2014) e Vecchi et al. (2015a) são resolvidos a partir da utilização de métodos exatos, cuja limitação está na quantidade de nós considerados como pontos de coleta, sendo necessária realizar simplificações nesta grandeza para que o mesmo fosse utilizado com sucesso.

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados

Trabalho	Contexto	Tipo de Problema	Método de Resolução
Silva et al. (2013)	Comparação de Heurísticas	PCV	Vizinho Mais Próximo, IMD, IMR, IMP
Schoroeder e Jesus (2013)	Coleta de Resíduos na Zona Rural	PCV	Vizinho Mais Próximo e Subcircuito Inverso
Hachicha et al. (2014)	Coleta de Lixo Hospitalar	PRV	Algoritmo Exato baseado em PL
Moro et al. (2015)	Distribuição de Produtos	PCV	Vizinho Mais Próximo e Subcircuito Inverso
Alves (2015)	Patrulhamento Escolar	PCV	Vizinho Mais Próximo e Busca Tabu
Vecchi et al. (2015a)	Coleta de Resíduos Urbanos	PRV	Programação Linear Mista
Reis et al. (2016)	Distribuição de Produtos	PCV	Vizinho Mais Próximo e Subcircuito Inverso
Gilardino et al. (2017)	Coleta de Resíduos Urbanos	PRV	Abordagem Heurística Própria
Pinheiro et al. (2017)	Visita Técnica à Clientes	PCV	Vizinho Mais Próximo e <i>Simulated Annealing</i>
Este Trabalho	Coleta de Lixo Hospitalar	PCV	Vizinho Mais Próximo e Inserção do Mais Distante

Normalmente, os trabalhos presentes na literatura relacionados à coleta de resíduos urbanos aplicam métodos de procura nas arestas quando a coleta é realizada de porta em porta, ou rua em rua. No caso específico abordado pelo presente trabalho, de coleta de lixo hospitalar, as demandas são localizadas em sítios de clientes, representadas por nós na rede. A partir dessas informações, esta projeto foi formulado com base no Problema do Caixeiro Viajante, um algoritmo heurístico foi aplicado para calcular a melhor rota de coleta.

4 Otimização de Rotas de Coleta de Lixo Hospitalar na cidade de Picos - PI

A ANVISA e o CONAMA regulamentam o controle de processos desde a segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento até a disposição final de resíduos sólidos. No entanto, a ênfase principal deste trabalho concentra-se em apenas uma parte do problema de gerenciamento de resíduos sólidos de saúde, que é a coleta e o transporte, tendo como objetivo, apresentar uma proposta computacional que otimize a rota atualmente empregada pelo veículo coletor.

Para tal, a metodologia utilizada foi a implementação de dois algoritmos baseados na heurística do Vizinho Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante, com propósito de resolver a representação do problema em Grafos assimétricos. Na Teoria dos Grafos o problema de roteirização aqui abordado é intitulado como Problema do Caixeiro Viajante, cujo objetivo é determinar um caminho de menor custo, passando por todos os vértices apenas uma vez.

Este Capítulo descreve o estudo de caso e os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos. O capítulo é subdividido nas seguintes seções: Características do Problema, que inclui a coleta dos dados e a rota atualmente empregada, em seguida tem-se na Seção 4.2 a metodologia aplicada para a otimização da coleta e por fim, os a análise dos resultados obtidos na Seção 4.3.

4.1 Características do Problema

Este trabalho aborda a coleta pública de lixo hospitalar na cidade de Picos - Piauí, que é realizada de quarta à sábado pela empresa Eco Resíduos, contratada pela Prefeitura Municipal exclusivamente para essa função. A empresa está localizada na Avenida Senador Helvídio Nunes, nº 3267, Bairro Junco, que é o ponto de partida e chegada.

O objetivo da utilização desta empresa é a análise de suas rotas atuais de visitação e coleta para, se possível, otimizá-las, a partir da aplicação das heurísticas de Inserção do Mais Distante e Vizinho Mais Próximo, para resolver o problema classificado como PVC completo e assimétrico.

A empresa Eco Resíduos é responsável pela coleta dos RSS de 50 estabelecimentos de saúde no município, destes, 24 são visitados semanalmente e os outros 26, a maioria na zona rural, quinzenalmente. A coleta da zona urbana é dividida em 3 dias: quarta, quinta e sexta-feira. A quinzenal é dividida em duas rotas, de 13 pontos cada, que tem seu lixo recolhido alternadamente aos sábados.

4.1.1 Coleta de Dados

Informações como pontos de coleta e ordem de visita são fundamentais para a montagem do cenário. Dados da frota coletora e o roteiro atual de coleta foram disponibilizados pela empresa e utilizados como base para comparação dos resultados. O endereço dos estabelecimentos foram fornecidos pela Prefeitura Municipal de Picos e convertidos em coordenadas geográficas (latitude e longitude) com auxílio do *GoogleMaps*. A utilização dessas coordenadas fornece um maior grau de precisão e com isso resultados mais significativos para a pesquisa.

Entretanto, não é possível efetuar a otimização somente com os endereços, torna-se necessário calcular as distâncias relativas entre todos os pontos. Para isso, foi utilizada a API *Distance Matrix* do *Google*, que através de uma solicitação HTTP¹ fornece como resposta em formato XML², a distância e o tempo de deslocamento para uma matriz de origens e destinos, com base na rota recomendada entre os pontos inicial e final especificados (GOOGLE, 2018).

Foi implementada uma aplicação em *Java*³, para criar as URLs⁴ com as coordenadas geográficas de origem e destino, pois a API possui um limite de 8192 caracteres por URL, o que equivale à 9 endereços, sendo necessário fazer um rodízio de URLs para se obter o custo de todos os pares de vértices do caso estudado. Essa mesma aplicação faz a leitura do arquivo XML gerado, armazenando os custos de ij em uma matriz de distância e de tempo de deslocamento respectivamente. No Apêndice A pode ser observado um exemplo de URL para solicitação HTTP da *Distance Matrix* API e o arquivo XML gerado.

O caso em estudo foi classificado como PCV assimétrico, pois os custos de ij nem sempre são iguais ao custo de ji , devido à diversos fatores como por exemplo o sentido de circulação das vias, o caminho de i até j pode ser diferente de j até i . Vale ressaltar, que os valores obtidos pela *Distance Matrix* API são de rotas reais, que levam em consideração o menor caminho físico possível, inclusive, o sentido das vias e as condições de tráfego local.

4.1.2 Rota Atual

Na cidade de Picos - PI, 50 estabelecimentos públicos de saúde estão sob a responsabilidade da empresa Eco Resíduos para coletar o lixo por eles produzidos. Devido a grande quantidade de pontos de coleta, as rotas são divididas da seguinte maneira: 7 pontos na

¹ HTTP: Hypertext Transfer Protocol, em português Protocolo de Transferência de Hipertexto, é um protocolo de comunicação, utilizado para sistemas de informação de hipermídia, distribuídos e colaborativos (TANENBAUM, 2003).

² XML: do inglês eXtensible Markup Language, é uma linguagem de marcação recomendada pela W3C para a criação de documentos com dados organizados hierarquicamente (W3C, 2018).

³ Java: Linguagem de programação orientada à objetos.

⁴ URL: Uniform Resource Locator ou em português Localizador Uniforme de Recursos, resumidamente, é o endereço virtual de recursos disponível em uma rede.

quarta-feira, 8 na quinta e 9 na sexta-feira. Aos sábados, revezadamente tem-se duas rotas com 13 pontos de coleta cada, totalizando 26. No Apêndice B estão relacionados e identificados por um número todos os pontos de coleta e igualmente o dia da coleta e a sequência da visita neste dia. As suas distribuições geográficas podem ser observadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 – Pontos de Coleta Semanal

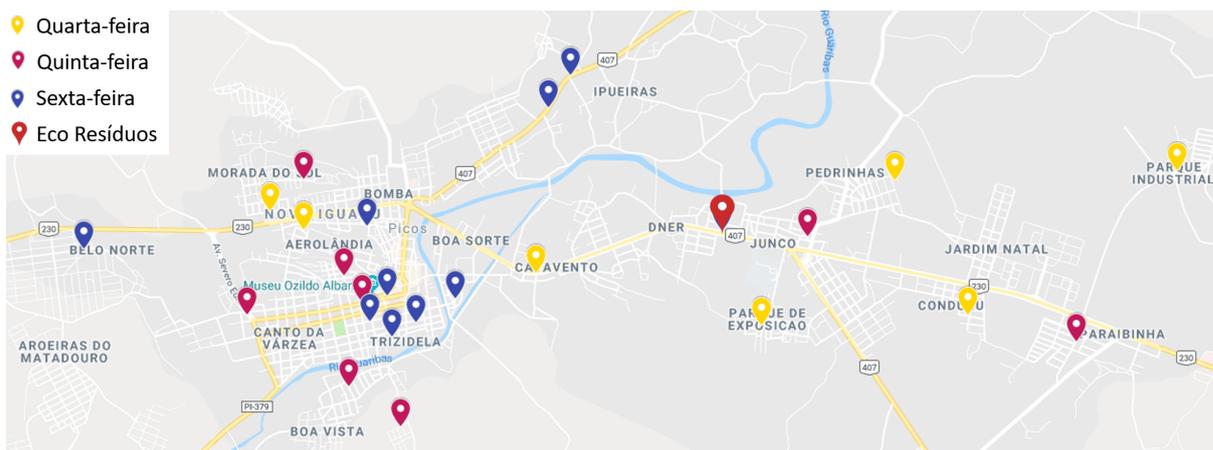
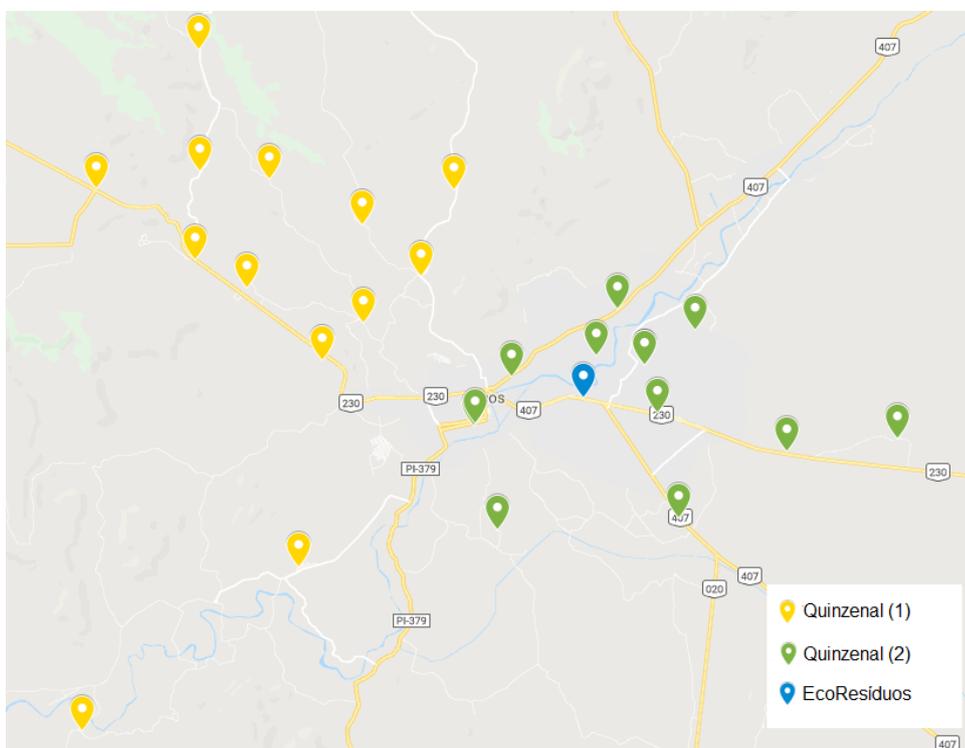


Figura 11 – Pontos de Coleta Quinzenal



O objetivo deste trabalho é organizar as rotas de forma a minimizar os custos com a coleta de lixo hospitalar. Atualmente, nenhum método tem sido adotado para definir o

trajeto a ser percorrido pelo veículo coletor, a responsabilidade é dos funcionários, que com base no seu conhecimento e experiência, buscam a melhor rota possível.

4.1.3 Custo Atual

De acordo com a ordem de visitação fornecida pela empresa, foram obtidos, a partir das matrizes geradas pela API, os custos das rotas atualmente empregadas (Tabela 2), que consistem em sair do ponto de partida (Eco Resíduos), visitar todos os pontos pertencentes à rota do respectivo dia e retornar ao ponto inicial. Os estabelecimentos devem ser visitados em horário comercial, sem restrição do dia da semana, desde que seu lixo seja coletado no mínimo uma vez por semana, nas rotas semanais, ou duas vezes por mês, nas rotas quinzenais.

Tabela 2 – Custo da Rota Atual

Dia	Tempo	Distância
Quarta-feira	1hr 13min	34,8 km
Quinta-feira	1hr 17min	31,4 km
Sexta-feira	1hr 3min	25,5 km
Sábado (1)	2hr 51min	108,5 km
Sábado (2)	2hr 2min	63,4 km

4.1.4 Frota Coletora

A coleta dos resíduos de saúde é baseada no fluxo diário de lixo produzido pelos estabelecimentos estudados, levando em consideração a quantidade de quilômetros percorridos, o tempo de deslocamento e o número de veículos que se faz necessário para atender a demanda. Neste caso somente um veículo é suficiente para realizar a coleta.

O veículo utilizado é uma Fiorino Furgão motor 1.3, da marca Fiat, com ano de fabricação em 2010, movido à álcool ou gasolina, que de acordo com o fabricante percorre em média 10,3 Km por litro de gasolina dentro da cidade. O mesmo tem uma capacidade de carga útil de 3.200 litros ou 620Kg. (FIAT, 2010)

4.1.5 Custo de Combustível

Atualmente, a variação semanal de preços dos combustíveis nos postos é grande, e tem gerado greves e manifestos mediante o crescente aumento do preço dos combustíveis, principalmente este ano de 2018. Esses aumentos de combustíveis constantes tem sido um problema para o custo de transportes de cargas, mercadorias, inclusive de resíduos sólidos.

O cálculo do custo mensal de combustível é descrito pela Equação 4.1, onde Cc é o custo mensal de combustível (R\$/mês); PC é o preço por litro de combustível; U é a

quilometragem média total mensal percorrida pelo veículo coletor; e finalmente d é a quilometragem média de consumo por litro.

$$Cc = \frac{PC * U}{d} \quad (4.1)$$

Neste estudo, foi considerada a gasolina como o combustível utilizado pela empresa e o seu preço em Picos - PI no dia 21/10/2018 que era R\$ 4,99 por litro. Aplicando os valores da rota atual na fórmula apresentada, tem-se um gasto mensal aproximado de R\$ 440,00 com combustível.

4.2 Otimização da Coleta

O Problema do Caixeiro Viajante tem o objetivo de resolver o problema de cobertura dos vértices, neste caso, os estabelecimentos de saúde que precisam ser visitados um a um, no seu respectivo dia de coleta, saindo e retornando à garagem da empresa responsável pela coleta dos resíduos sólidos de saúde.

Ao analisar a distribuição geográfica dos pontos de coleta semanais (quarta, quinta e sexta-feira) foi notada a chance de melhorar o agrupamento dos pontos. Após a coleta dos dados, a metodologia proposta dividiu-se em quatro etapas: na primeira etapa foi aplicado o algoritmo de Teitz e Bart para a determinação das medianas, cuja a quantidade se dá pela quantidade de rotas por dia da semana; na segunda etapa, foi utilizado o algoritmo de Gillet e Johnson modificado, definindo os *clusters*⁵ de pontos a serem atendidos em cada dia da semana. Na terceira etapa foi definida a rota para cada dia, utilizando as heurísticas construtivas do Vizinheiro Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante para determinar a sequência em que os pontos deveriam ser visitados. Na última etapa foi realizada a análise e comparação entre as rotas obtidas pelas heurísticas, verificando a melhor opção de resolução para o caso abordado.

Após a obtenção das matrizes de tempo e de distância, referentes a cada rota, foi possível aplicar as heurísticas para definir a roteirização. Os algoritmos foram implementados em linguagem Java versão 8.0, utilizando a IDE Eclipse Oxygen 2 e executados em um computador Intel(R) Celeron(R) (1.60 GHz e 4 Gb de RAM).

4.2.1 Reagrupamento dos *Clusters* Semanais

Considerando a coleta semanal, formada por 24 pontos no total, dividida em 3 dias de recolha, obteve-se um quociente exato de 8 pontos por dia. A rota atual visitava 7 pontos na quarta-feira, 8 na quinta e 9 na sexta-feira. Baseando-se nessa delimitação, definiu-se p -medianas como a quantidade de dias de coleta na semana (3), e n a quantidade de pontos que devem ser associados a cada mediana ($n < 8$).

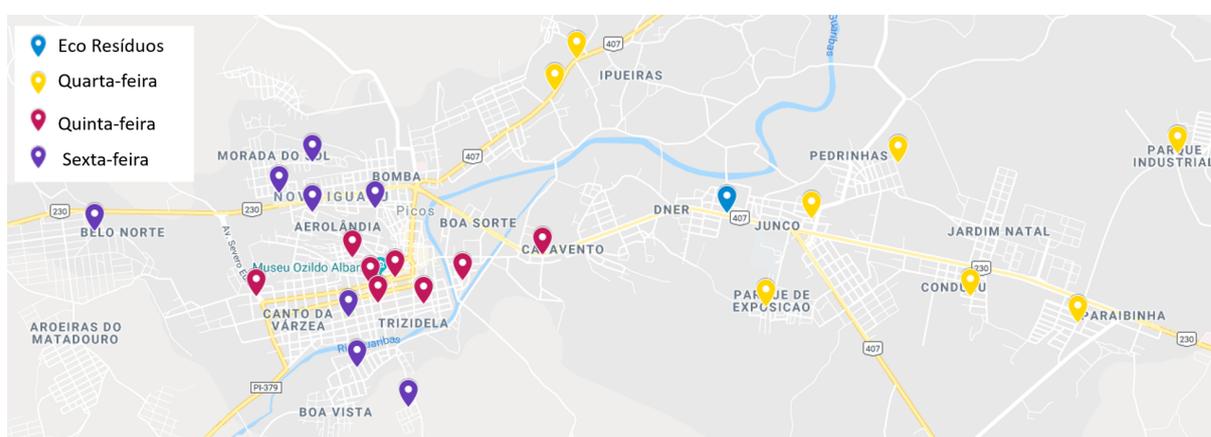
⁵ Cluster, do inglês: grupo ou aglomerado.

Em um primeiro momento foram geradas as matrizes de tempo e distância de acordo com os vértices de cada rota atualmente empregada. Para que fosse possível realizar o reagrupamento, foi necessário criar uma matriz de distâncias entre todos os 24 pontos da rota semanal, esta pode ser visualizada no Apêndice C.

Salienta-se que as medianas foram obtidas através do algoritmo de Teitz e Bart, enquanto que os agrupamentos dos *clusters* foram gerados com a execução do algoritmo de Gillet e Johnson modificado. As medianas selecionadas e a designação dos pontos de cada uma delas podem ser conferidas no Apêndice D.

Após realização do reagrupamento, foi obtida a seguinte divisão geográfica dos estabelecimentos de coleta semanal, de tal forma que os estabelecimentos podem ser melhor identificados na Figura 12:

Figura 12 – Reagrupamento da Coleta Semanal



4.2.2 Criação das Novas Rotas

Para a criação das novas rotas foram utilizadas as matrizes de distância e de tempo, criadas de acordo com a divisão original por dia (Tabela 5) e as novas matrizes geradas depois do reagrupamento das rotas (Tabela 7), totalizando 12 matrizes para a rota semanal. No caso da rota quinzenal, que não houve necessidade de realizar o reagrupamento, foram utilizadas 2 matrizes para cada rota (Tabela 6), sendo uma de tempo e a outra de distância.

Nas tabelas 3 e 4 são dispostas as roteirizações para cada um dos agrupamentos de cada dia de coleta semanal. Primeiramente, fez-se a roteirização de acordo com a divisão original dos pontos e posteriormente reaplicados os algoritmos de construção de rotas de acordo com a divisão obtida pelo reagrupamento, conforme exposto na Seção 4.2.1. Em todas as roteirizações, o ponto de partida e chegada é a garagem da empresa (Eco Resíduos). As rotas foram criadas a partir das heurísticas do Vizinho Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante.

Como mencionado, foram consideradas duas matrizes para cada rota, uma de distância e outra de tempo, obtendo-se dois resultados diferentes para cada heurística, descritos na Tabela 3 da seguinte forma: VMP (tempo) é referente a heurística do Vizinho Mais Próximo levando em consideração a matriz de tempo e VMP (distância) leva em consideração a matriz de distâncias, a mesma referência serve para a heurística IMD. Quando não está explícita qual métrica significa que as rotas obtidas foram iguais. Destaca-se em vermelho o melhor resultado entre as duas heurísticas para cada dia.

Tabela 3 – Roteirização Semanal (Clusterização Original)

		Roteirização	Tempo	Distância
Quarta-Feira	VMP (tempo)	7-1-2-0-5-6-3-4-7	57 min	27 km
	VMP (distância)	7-5-6-3-4-1-2-0-7	59 min	27,5 km
	IMD (tempo)	7-2-0-1-5-3-4-6-7	56 min	26,1 km
	IMD (distância)	7-2-0-1-5-4-3-6-7	57 min	26,1 km
Quinta-Feira	VMP (tempo)	8-7-6-4-3-0-2-1-5-8	67 min	27,7 km
	VMP (distância)	8-7-6-0-2-3-4-1-5-8	71 min	28,8 km
	IMD	8-5-1-2-0-3-4-6-7-8	61 min	26 km
Sexta-Feira	VMP	9-0-1-3-2-4-6-7-8-5-9	52 min	23,8 km
	IMD (tempo)	9-8-7-6-5-2-3-4-1-0-9	46 min	19,8 km
	IMD (distância)	9-0-1-4-3-2-5-6-7-8-9	47 min	20,4 km
Quinzenal (2)	VMP (tempo)	13-0-5-8-2-9-4-7-1-3-6-12-11-10-13	127 min	70,3 km
	VMP (distância)	13-0-5-8-2-6-3-1-12-11-10-9-4-7-13	112 min	62,1 km
	IMD (tempo)	13-1-12-11-10-9-7-4-2-5-8-6-3-0-13	114 min	61,3 km
	IMD (distância)	13-10-12-11-1-3-0-5-8-6-4-7-9-2-13	110 min	56 km

As rotas consideradas ótimas representadas pelos roteiros propostos pelo modelo foram criadas através da heurística IMD levando em consideração a matriz de distâncias e a clusterização proposta.

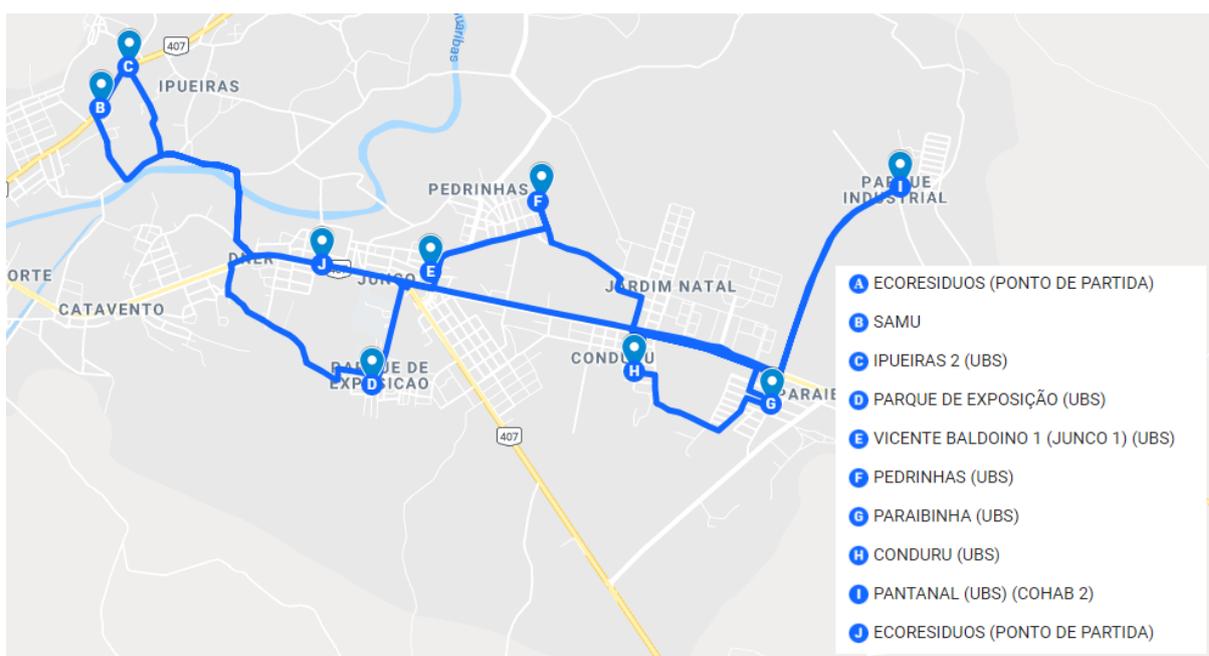
A Figura 13 apresenta no mapa a rota proposta para quarta-feira, em seguida, a Figura 14 a rota para quinta-feira, a rota de sexta-feira pode ser vista na Figura 15 e por fim na Figura 16 têm-se a rota nomeada como Quinzenal (2). Os pontos no mapa estão representados por letra, na legenda observa-se a ordem de inserção, seguindo ordem alfabética, de acordo com o roteiro apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Roteirização Semanal (Clusterização Proposta)

		Roteirização	Tempo	Distância
Quarta-Feira	VMP	8-1-7-4-0-6-2-3-5-8	73 min	32,1 km
	IMD (tempo)	8-2-3-7-5-4-0-6-1-8	56 min	28,3 km
	IMD (distância)	8-3-2-6-1-7-0-4-5-8	63 min	27,1 km
Quinta-Feira	VMP	8-7-4-5-6-1-0-3-2-8	38 min	15,6 km
	IMD (tempo)	8-2-3-6-1-0-5-4-7-8	33 min	13,7 km
	IMD (distância)	8-4-5-6-2-3-1-0-7-8	33 min	12,4 km
Sexta-Feira	VMP (tempo)	8-2-7-6-3-5-0-4-1-8	64 min	25,8 km
	VMP (distância)	8-2-7-6-3-5-0-1-4-8	65 min	26,3 km
	IMD (tempo)	8-2-6-1-7-4-3-5-0-8	53 min	22,5 km
	IMD (distância)	8-2-1-7-4-6-3-5-0-8	54 min	22,4 km

As imagens foram obtidas através do *Google My Maps* que adiciona os marcadores através das coordenadas de cada ponto e facilita traçar a rota de um ponto ao outro conforme o trajeto de carro sugerido pelo *Google Distance Matrix API*.

Figura 13 – Roteiro Proposto (Quarta - Feira)



As rotas obtidas pelas heurísticas para otimização da coleta quinzenal (1) podem ser

Figura 14 – Roteiro Proposto (Quinta - Feira)

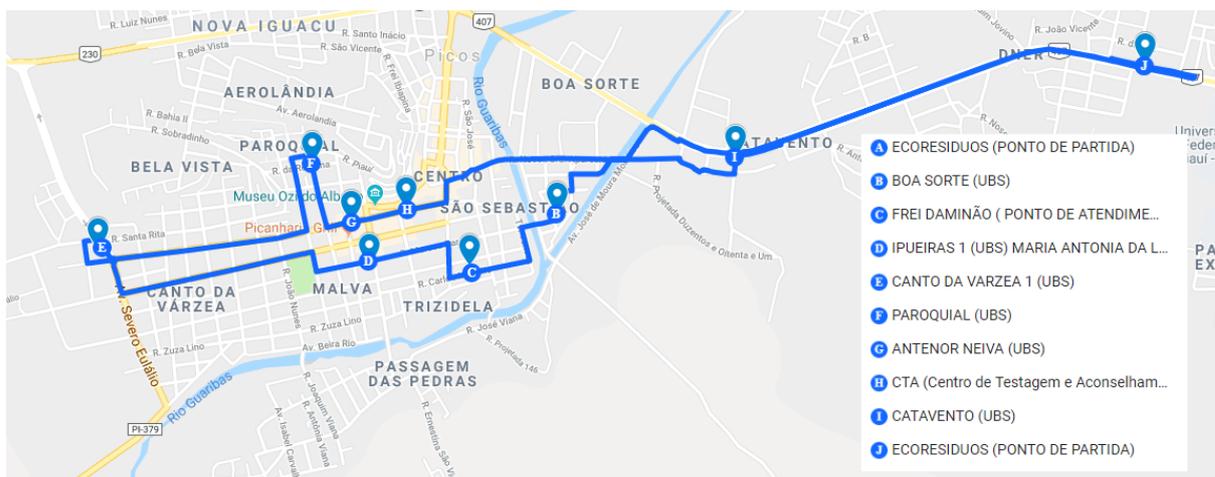


Figura 15 – Roteiro Proposto (Sexta - Feira)

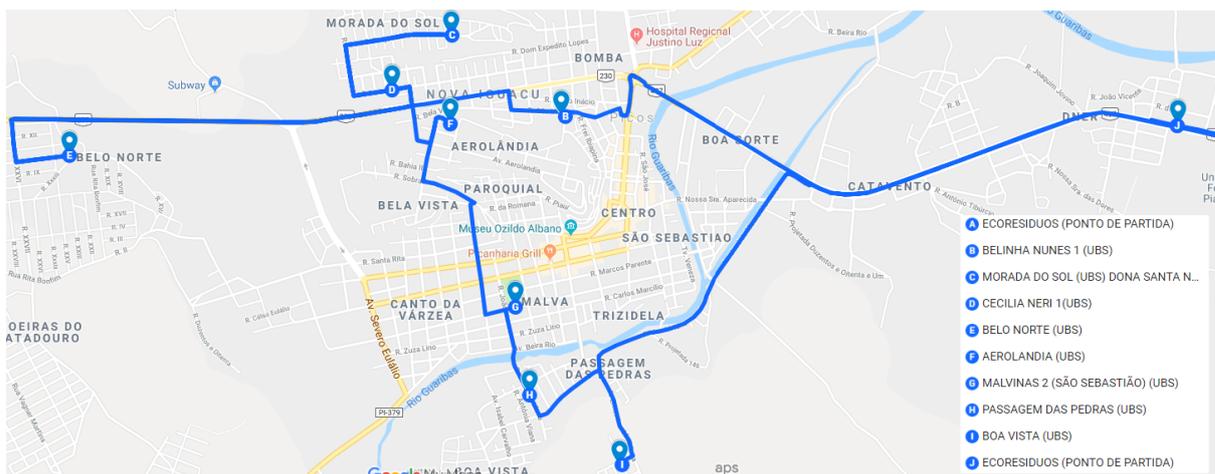
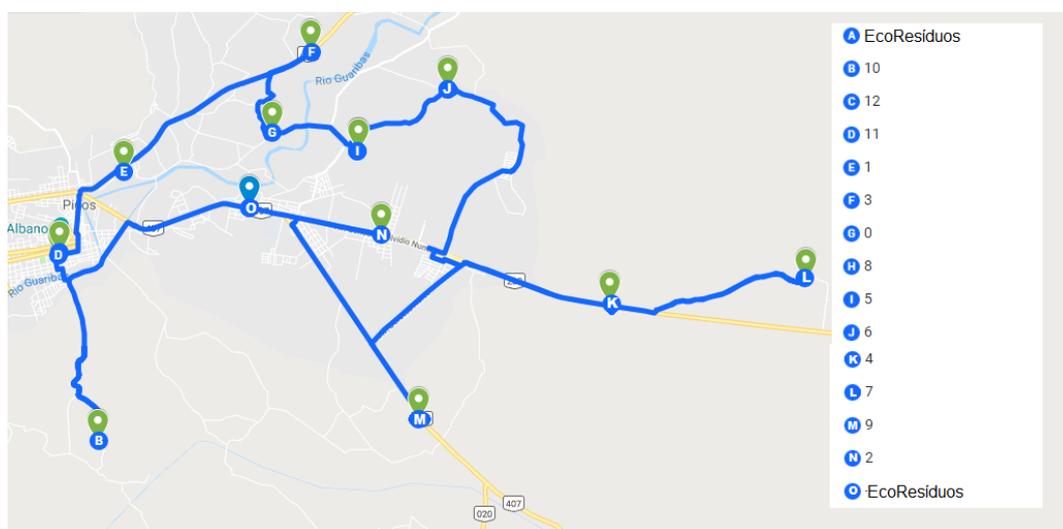


Figura 16 – Roteiro Proposto (Quinzenal (2))

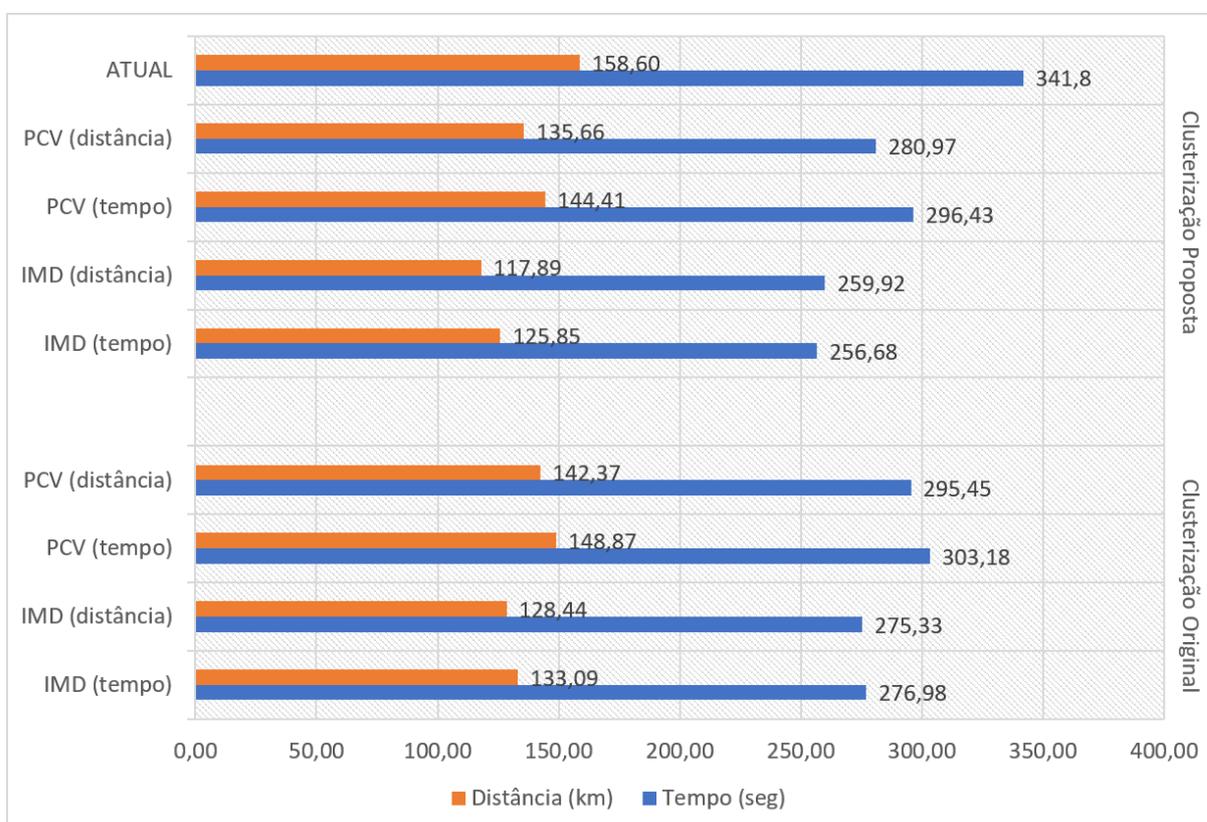


consultadas no Apêndice E, estas não apresentaram reduções relevantes, portanto não s
inclusas nas estimativas dos resultados.

4.3 Análise dos Resultados

Para melhor visualização e interpretação dos resultados foi feita uma comparação com a rota atualmente empregada. A comparação entre os resultados fornece uma visão entre roteirizações possíveis, com a média de tempo utilizada nas rotas e distância total percorrida pelas rotas. De acordo com o gráfico da Figura 17 pode-se observar o desempenho de cada heurística, levando em consideração as matrizes de tempo ou distância, tanto para a clusterização original quanto para a clusterização proposta. Em todos os casos a heurística de Inserção do Mais Distante propõe soluções classificadas como ótimas, pois a distância total a ser percorrida é mínima, se comparada com as rotas propostas pela heurística do Vizinho Mais Próximo.

Figura 17 – Gráfico Comparativo dos Resultados Obtidos pelas Heurísticas

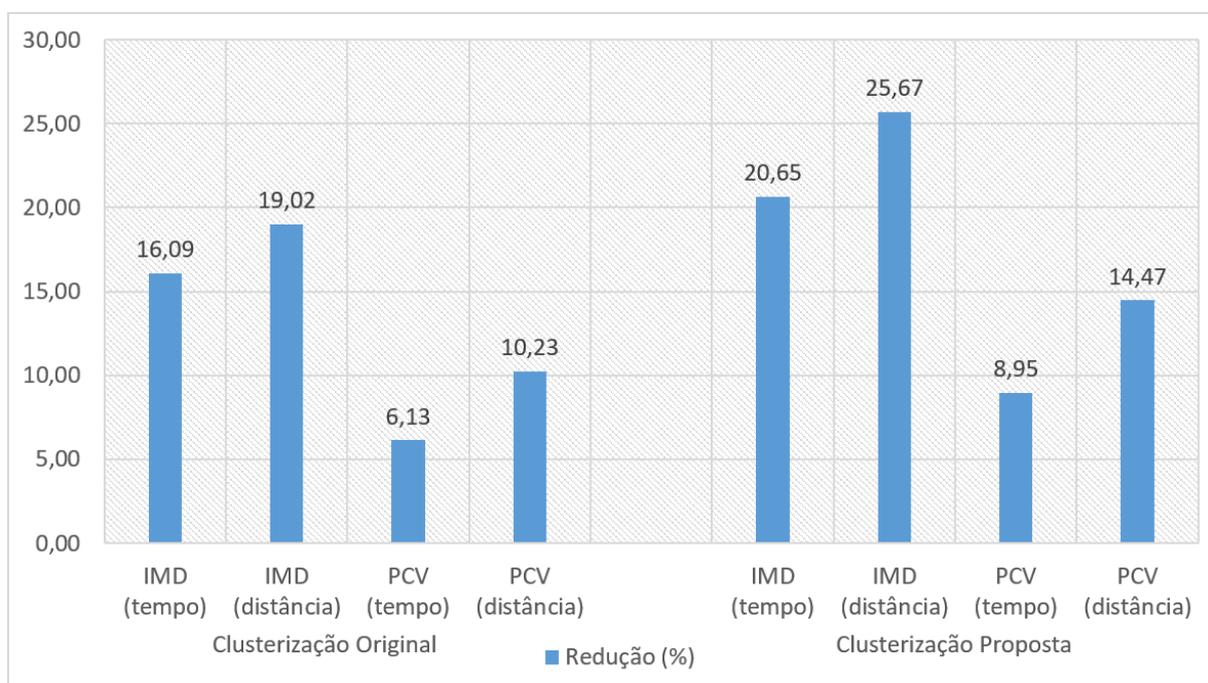


Constatou-se também que não houve vantagem em considerar as matrizes de tempo, já que o tempo total resultante quase sempre é maior quando a heurística utiliza a matriz de tempo se comparado com o tempo total obtido levando em consideração a matriz de distância.

Para uma melhor avaliação do desempenho de cada heurística pode-se observar no gráfico da Figura 18 os percentuais da redução obtida por cada heurística em particular. Fica claro que a heurística de Inserção do Mais Distante é capaz de encontrar rotas mais próximas de serem consideradas ótimas, com um percentual de 25,67% de redução da

distância percorrida pela rota original.

Figura 18 – Gráfico Percentual da Redução Obtida pela Otimização

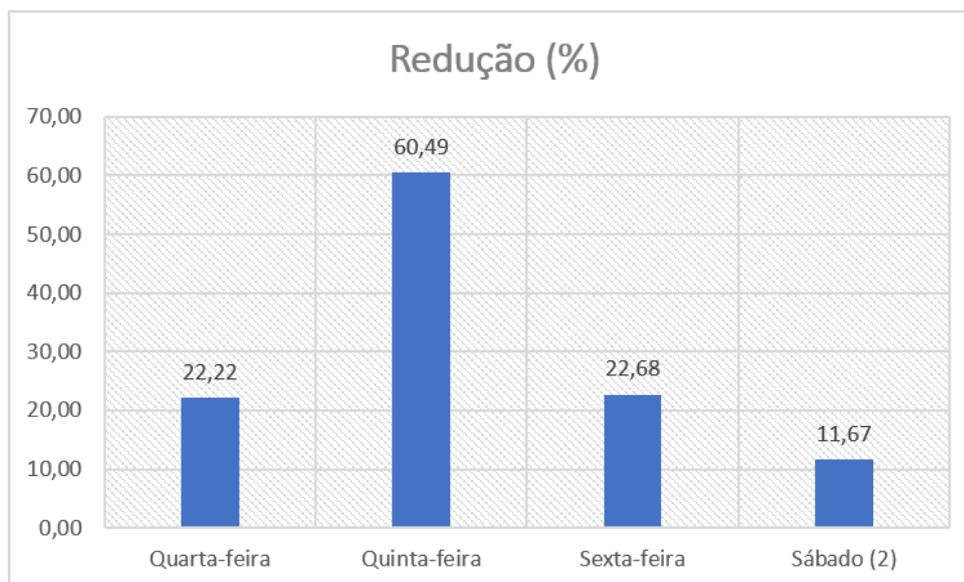


Evidencia-se que a clusterização proposta obtém em todos os casos melhores soluções, com maiores reduções, provando a importância de organizar corretamente os grupos de pontos de coleta. A todo momento foram apresentadas soluções tanto para o agrupamento original quanto para o proposto, para justamente evidenciar esse resultado, onde a clusterização proposta obtém uma redução 6% maior do que a solução considerada ótima no agrupamento original.

Considerado as soluções tidas como ótimas, foram apresentadas na Figura 19 as reduções obtidas com a otimização para cada dia de coleta, os valores foram distribuídos em um gráfico para melhor interpretação. Na Quarta-feira a otimização resultou na economia de 22,22% da rota, com 7741 metros a menos que a rota atual empregada para este dia. Na Quinta-feira a economia foi ainda mais surpreendente, chegando a uma redução de 60,49%, equivalente a 19000 metros. Na Sexta-feira a economia foi de 22,68%, cerca de 6569 metros a menos que a rota atual. A rota quinzenal (2) obteve apenas 11,67% de economia o que equivale à 7400 metros.

No total tem-se uma redução semanal de 40,7 Km e mensal em torno de 148 Km. Em um ano é percebida uma economia muito relevante de 1776 Km. Essa distância é aproximadamente equivalente ao que o veículo coletor percorre em cinco meses utilizando a rota proposta. De acordo com os resultados apresentados, aplicando as rotas otimizadas a empresa estaria economizando cinco meses de trabalho, diminuindo as distâncias percorridas, otimizando o tempo de coleta de lixo e conseqüentemente a diminuição da fadiga dos funcionários e economia de combustível do veículo. Transformando esses resultados

Figura 19 – Gráfico da Redução obtida pela Heurística IMD por Rota



em custos financeiros, tendo em vista o custo do combustível apresentado na seção 4.1.5, obtêm-se uma economia anual de R\$ 1658,00. Vale ressaltar que esse valor é aproximado e não leva em conta que o preço do combustível oscila durante o ano.

5 Conclusão

O presente trabalho apresentou uma proposta de otimização da coleta pública de lixo hospitalar na cidade de Picos - Piauí. Para atingir este objetivo, foi utilizado o algoritmo de Teitz e Bart para P-Medianas, conforme os dias de coleta semanal retratados pela empresa (quarta, quinta e sexta-feira) e foi definido o número de medianas como o número de rotas semanais (3).

Os demais estabelecimentos de saúde, não selecionados pelo algoritmo de Teitz e Bart, foram agrupados às medianas através da aplicação do algoritmo de Gillet e Johnson modificado, conforme descrito na Seção 4.2. Com os agrupamentos de coleta formados, foi estabelecida a melhor roteirização para a coleta dos RSS, utilizando-se para tanto as heurísticas de construção de rotas do Vizinho Mais Próximo e de Inserção do Mais Distante para solucionar o problema formulado como problema do caixeiro viajante assimétrico.

Foram apresentadas soluções tanto para a divisão original dos pontos de coleta, quanto para a clusterização proposta. Diante disso, observou-se que a clusterização proposta obtém uma redução 6% maior do que a solução considerada ótima no agrupamento original.

É necessário ressaltar que não foram realizados reagrupamentos para as duas rotas quinzenais (Quinzenal (1) e Quinzenal (2)), estas obtiveram a otimização a partir da aplicação somente das heurísticas construtivas. Como resultado foi obtida uma redução de 11,67% na rota Quinzenal (2) e na rota Quinzenal (1) os resultados obtidos não foram satisfatórios conforme apresentado no Apêndice E. Contudo, ressalta-se a importância dos conhecimentos empíricos do motorista, da sua experiência e capacidade de escolher os roteiros sem nenhum apoio computacional.

O comparativo dos dados da coleta de lixo hospitalar, fornecidos pela empresa EcoResíduos, com os resultados alcançados, mostrou que as técnicas de Pesquisa Operacional utilizadas são uma alternativa para a redução das distâncias. A heurística VMP propõe rotas que apresentam redução de até 14,47% nas distâncias percorridas e por fim, destaca-se a redução de 25,67% da rota construída através da heurística IMD.

Se as metodologias desenvolvidas forem aplicadas à cidade de Picos - PI, pode-se conseguir uma redução nos custos, o que pode gerar uma economia significativa. A Menor distância percorrida pelo veículo coletor proporciona redução das despesas com combustível, desgaste e consequente manutenção dos veículos, podendo chegar a uma economia média anual de até R\$ 1658,00 nos gastos com combustível.

5.1 Trabalhos Futuros

No decorrer do desenvolvimento deste estudo foram identificadas algumas oportunidades para o desenvolvimento de futuras pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho.

Entre elas se destacam:

1. Podem ser associadas ao modelo proposto heurísticas de melhorias de rotas como por exemplo: 2-opt e 3-opt;
2. Aplicar outras técnicas de otimização para a solução do Problema do Caixeiro Viajante. Como as meta-heurísticas de algoritmos Genéticos ou Colônia de Formigas.
3. Estender o estudo para os estabelecimentos de coleta particular.

Referências

ABNT. *Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. Acesso em: 05 nov. 2018. Citado na página 15.

ABRELPE. *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil*. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2016. Acesso em: 13 nov. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 16.

ABRELPE. *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil*. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2017. Acesso em: 05 nov. 2018. Citado na página 15.

AFONSO, M. L. *Otimização de rotas na recolha de resíduos urbanos: estudo de um caso real*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Economia e Gestão, 2012. Citado na página 17.

AGOSTINI, B. D. Uma análise experimental de abordagens topológicas aplicadas ao problema do caixeiro-viajante através de otimização por nuvem de partículas. 2015. Citado na página 22.

ALVES, R. *Modelo matemático para seleção de rotas de patrulhamento escolar: o caso da patrulha escolar de Ponta Grossa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 13, 21, 26 e 27.

ARENALES, M. et al. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017. Citado na página 17.

BENEVIDES, P. F. Aplicação de heurísticas e metaheurísticas para o problema do caixeiro viajante em um problema real de roteirização de veículos. 2011. Citado na página 22.

BILBER, J. C. d. A. et al. Gestão de rotas na recolha de resíduos. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

BRASIL, C. N. d. M. A. *Resolução CONAMA nº 358, de 29 de abril de 2005*. [S.l.], 2005. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5046>>. Acesso em: 14 nov. 2017. Citado na página 16.

BRASIL, M. d. S. A. N. d. V. S. *Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde*. [S.l.], 2006. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/servicosaude/manuais/manual_gerenciamento_residuos.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2017. Citado na página 16.

CORRÊA, E. S. Algoritmos genéticos e busca tabu aplicados ao problema das p-medianas. *M. Sc. Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, Brazil*, 2000. Citado na página 24.

FIAT, F. I. A. T. *Manual Uno-Fiorino - 2010*. 2010. Acessado em: 19 outubro de 2018. Disponível em: <<https://www.fiat.com.br/content/dam/fiat-brasil/manuais-carros/fiorino/2010/Uno-Fiorino-2010.pdf>>. Citado na página 31.

- GILARDINO, A. et al. Combining operational research and life cycle assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in lima (peru). *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 156, p. 589–603, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. [S.l.]: Elsevier, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- GOMES, C. S. de A. *Problema do caixeiro viajante*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2008. Citado na página 20.
- GOOGLE, D. *GoogleMaps Distance Matrix API*. 2018. Acessado em: 19 outubro de 2018. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/start>>. Citado na página 29.
- GRACIOLLI, O. D. et al. Otimização de roteiros de veiculos coletores de residuos solidos de serviços de saude. 1994. Citado na página 17.
- HACHICHA, W. et al. Routing system for infectious healthcare-waste transportation in tunisia: A case study. *Environmental Engineering and Management Journal*, v. 13, n. 1, p. 21–29, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- KRIPKA, R. M. L.; SELONG, L. M. Otimização de roteiros: estudo de caso de uma distribuidora de ferro de passo fundo/rs para a região. *Revista CIATEC-UPF*, v. 1, n. 1, p. 14–31, 2009. Citado na página 20.
- LAGO, C. A. F. do; TURCI, L. F. R. Transporte escolar no campus de poços de caldas da universidade federal de alfenas: Otimização de rotas. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 3, n. 1, 2015. Citado na página 13.
- MAGALHÃES, M. *Otimização de Rotas*. [S.l.]: Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Citado na página 20.
- MEIRELES, F. *Coleta seletiva de lixo é tarefa complicada em Teresina*. 2009. Acessado em: 09 novembro de 2017. Disponível em: <<http://www.portalodia.com/noticias/geral/-coleta-seletiva-de-lixo-e-tarefa-complicada-em-teresina-51394.html>>. Citado na página 13.
- MORO, M. F. et al. Otimização de rotas: Um estudo de caso em uma empresa do setor atacadista. *Revista ESPACIOS/ Vol. 36 (Nº 07) Año 2015*, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 13, 26 e 27.
- NETO, J. C. Proposta de otimização e sistematização na entrega de bens permanentes no poder judiciário do paraná. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- PINHEIRO, C. C. et al. Abordagens heurísticas para roteirização em uma empresa de outsourcing de impressão. Joinville, SC, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 13, 18, 26 e 27.
- RAFF, S. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 63–211, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- RAMOS, J. M. B. et al. Implementação e análise do problema caixeiro viajante usando uma nova abordagem através dos algoritmos genético e simulated annealing. Florianópolis, SC, 2001. Citado na página 21.
- REGO, H. M. R. Problemas de rotas em recolha de resíduos urbanos: uma abordagem heurística. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- REIS, C. C. C. dos et al. Técnicas de pesquisa operacional aplicadas na otimização de rotas de uma rede de lojas de materiais de construção. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 26 e 27.
- SCHOROEDER, W.; JESUS, G. C. d. Otimização da rota ótima de coleta seletiva de resíduos na área rural do município de missal - paraná, utilizando heurísticas de solução do problema do caixeiro viajante. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 13, 26 e 27.
- SILVA, G. A. N. d. et al. Algoritmos heurísticos construtivos aplicados ao problema do caixeiro viajante para a definição de rotas otimizadas. In: *Colloquium Exactarum*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 5, n. 2, p. 30–46. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- TANENBAUM, A. S. *Redes de Computadores*. São Paulo: Ed. [S.l.]: Campus, 2003. Citado na página 29.
- TIBURCIO, D. M. Técnicas da pesquisa operacional na abordagem do problema de roteamento no transporte de funcionários de empresas. 2012. Citado na página 23.
- VECCHI, T. et al. Otimização do planejamento de rotas na coleta de resíduos sólidos. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 12560–12567, 2015a. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- W3C, W. W. W. C. *XML*. 2018. Acessado em: 19 outubro de 2018. Disponível em: <<https://www.w3.org/XML/>>. Citado na página 29.

Apêndices

APÊNDICE A – *Distance Matrix* API

Neste Apêndice podemos observar um exemplo de URL com a explicação de cada um dos parâmetros utilizados, e em seguida o modelo (resumido) do arquivo XML gerado por essa solicitação HTTP da API.

URL: <https://maps.googleapis.com/maps/api/distancematrix/xml?origins=-7.079616,-41.496305|-7.095473,-41.46796|-7.085484,-41.481736|-7.073404,-41.476629|-7.087866,-41.407535|-7.081987,-41.473024|-7.091853,-41.472612|-7.078521,-41.431632|-7.077979,-41.439200&destinations=-7.084368,-41.471457&language=pt-BR&key=AIzaSyD9UtqBbnc3FkO7uuy233E1SHNLA1CfU6A>

Parâmetros utilizados na URL:

- *origins* - O ponto de partida. É possível fornecer um ou mais locais separados pelo caractere: (|), na forma de um endereço, coordenadas de latitude / longitude ou um ID de local:

São utilizadas as coordenadas de latitude/longitude, pois essas são usadas inalteradamente para calcular a distância, obtendo mais precisão no resultado.

- *destinations* - Um ou mais locais para usar como ponto de término, seus parâmetros são os mesmos de *origins*.
- *key* - *key* da API. Essa chave identifica seu aplicativo para fins de gerenciamento de cotas, disponibilizada pela Google.
- *language* - O idioma no qual retornar resultados, no caso Português – Brasileiro.

Arquivo gerado:

Figura 20 – Modelo de arquivo XML

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
- <DistanceMatrixResponse>
  <status>OK</status>
  <origin_address>R. João Borges Leal, 204 - Belo Norte, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <origin_address>Av. Severo Eulálio, 2 - Canto da Várzea, Picos - PI, 64600-170, Brasil</origin_address>
  <origin_address>Av. Severo Eulálio, 2608-2694 - Canto da Várzea, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <origin_address>R. Moura Barbosa, 566 - Morada do Sol, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <origin_address>Conjunto Petrônio Portela Q 11 C22 - Paraibinha, PI, 64606-360, Brasil</origin_address>
  <origin_address>R. Osvaldo Cruz, 654 - Paroquial, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <origin_address>R. Antônia Viana, 319 - Passagem das Pedras, Picos - PI, 64600-406, Brasil</origin_address>
  <origin_address>R. Vinte e Dois, 148 - Junco, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <origin_address>Av. Senador Helvídio Nunes, 3271 - Junco, Picos - PI, 64600-000, Brasil</origin_address>
  <destination_address>Av. Nossa Sra. de Fátima, 518 - Canto da Várzea, Picos - PI, 64600-146, Brasil</destination_address>
- <row>
  - <element>
    <status>OK</status>
    - <duration>
      <value>471</value>
      <text>8 minutos</text>
    </duration>
    - <distance>
      <value>4217</value>
      <text>4,2 km</text>
    </distance>
  </element>
</row>
- <row>
  - <element>
    <status>OK</status>
    - <duration>
      <value>325</value>
      <text>5 minutos</text>
    </duration>
    - <distance>
      <value>1557</value>
      <text>1,6 km</text>
    </distance>
  </element>
  .....
</row>
- <row>
  - <element>
    <status>OK</status>
    - <duration>
      <value>633</value>
      <text>11 minutos</text>
    </duration>
    - <distance>
      <value>4365</value>
      <text>4,4 km</text>
    </distance>
  </element>
</row>
</DistanceMatrixResponse>

```

APÊNDICE B – Identificação dos Pontos de Coleta e Rota Atual

As Tabelas 5 e 6 relacionam e identificam por número (N) todos os pontos de coleta de acordo com o dia, a sequência de visita é apresentada na última linha das tabelas.

Tabela 5 – Estabelecimentos de Coleta Semanal

N	4ª Feira	5ª Feira	6ª Feira
0	AEROLANDIA (UBS)	ANTENOR NEIVA (UBS)	BOA SORTE (UBS)
1	CATAVENTO (UBS)	CANTO DA VARZEA (UBS)	FREI DAMIÃO
2	CECILIA NERI (UBS)	PAROQUIAL (UBS)	MALVINAS (UBS)
3	CONDURU (UBS)	PASSAGEM DAS PEDRAS (UBS)	IPUEIRAS 1 (UBS)
4	PANTANAL (UBS)	BOA VISTA (UBS)	CTA
5	PARQUE DE EXPOSIÇÃO (UBS)	MORADA DO SOL (UBS)	BELO NORTE (UBS)
6	PEDRINHAS (UBS)	PARAIBINHA (UBS)	BELINHA NUNES (UBS)
7	-	VICENTE BALDOINO (JUNCO) (UBS)	SAMU
8	-	-	IPUEIRAS 2 (UBS)
=	7-5-6-3-4-2-1-0-7	8-5-4-3-1-2-0-7-6-8	9-0-1-2-3-4-5-6-7-8-9

Tabela 6 – Estabelecimentos de Coleta Quinzenal

N	Quinzenal (1)	Quinzenal (2)
0	COROATÁ	CAPS AD I
1	CRISTOVINHO (ZR)	CAPS II
2	CURRALINHO (ZR)	CENTRO DE ZOONOZES
3	ESTRIVARIA (ZR)	LAGOA COMPRIDA (ZR)
4	FATIMA DO PIAUÍ (ZR)	MORRINHOS (ZR)
5	MIROLÂNDIA (ZR)	FORNOS (ZR)
6	PENITENCIARIA JOÃO DEUS BARROS	LAGOA GRANDE (ZR)
7	JUNCO DOS MONTEIROS (ZR)	VALPARAISO (ZR)
8	LAGOA DOS FELIX (ZR)	TABATINGA (ZR)
9	BOCOLO (ZR)	SAMAMBAIA (ZR)
10	TABOLEIRO DOS PIO (ZR)	SAQUINHO (ZR)
11	TRÊS POTES (ZR)	SECRETARIA DE SAÚDE
12	TORRÕES (ZR)	VIGILÂNCIA SANITÁRIA
=	13-10-12-3-9-2-1-7-0-8-5-4-11-6-13	13-2-4-7-9-11-12-10-1-0-5-8-6-3-13

APÊNDICE C – Matriz de Coleta Semanal

Tendo em vista que este trabalho foi elaborado considerando a distância entre 24 pontos de coleta semanal mais o ponto de partida, o que resulta numa matriz com 25 linhas e colunas, fez-se necessário dividir a matriz em duas partes (Figuras 21 e 22) para que tivesse uma melhor visualização. A referência da matriz segue a ordem apresentada na Tabela 5, sendo o intervalo de 1 - 7 os pontos da quarta-feira, de 8 - 15 referentes à quinta-feira, do 16 - 24 sexta-feira e o 25 representa a empresa Eco Resíduos.

Figura 21 – Matriz Todos os Pontos de Coleta Semanal - Parte 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	0	4804	8541	5657	2934	1811	5540	1495	5084	1557	3208	2017	1192
2	5663	0	9891	7007	2336	4387	4749	4170	6434	4133	2953	3118	4628
3	8545	9901	0	3216	7966	8747	6788	8417	3939	8284	10195	8993	8485
4	5657	7013	3212	0	5078	5859	3595	5529	961	5396	7307	6105	5597
5	2658	2357	8007	5123	0	1396	2865	1830	4550	1517	2651	1642	2384
6	2231	3737	7546	4662	1344	0	3232	1412	4089	1085	4031	1312	1958
7	5509	4703	7850	3543	2769	3550	0	3984	3191	3671	4998	3796	5450
8	1493	4129	8399	5515	2107	798	3995	0	4942	544	1713	1004	573
9	4626	5981	4121	1236	4047	4828	3113	4498	0	4365	6276	5074	4566
10	1516	3624	7801	4917	1599	255	3487	689	4344	0	2040	836	1243
11	2709	3085	10317	7433	2761	1434	5175	1217	6860	1179	0	1439	1675
12	1887	2436	8633	5749	1933	660	3892	747	5176	405	2081	0	1320
13	1192	4587	8481	5597	2680	1371	4568	573	5024	1116	2171	1577	0
14	1828	4155	6978	4094	1869	1410	3650	1288	3521	1155	2812	1616	1768
15	1523	4000	7728	4844	1607	1140	3495	823	4271	885	2536	1345	1250
16	1282	3519	8009	5125	1719	526	3607	404	4552	271	1928	732	989
17	5747	4168	11400	8516	3844	4472	6258	4254	7943	4217	3038	4628	4712
18	5116	4310	8243	3936	2376	3156	393	3591	3584	3278	4604	3403	5056
19	2934	1843	9075	6191	1341	1830	3933	1617	5618	1575	2138	1559	2076
20	2678	4336	5868	2984	2402	2671	3831	2550	2411	2417	4631	2877	2618
21	4541	1122	8769	5885	1214	3265	3627	3048	5312	3011	1831	1996	3506
22	7493	8849	1681	2164	6914	7695	5736	7365	2887	7232	9143	7941	7433
23	10095	11451	2450	4766	9517	10297	8339	9967	5489	9834	11745	10543	10035
24	6132	7488	5119	1450	5553	6334	4638	6004	1707	5871	7782	6580	6072
25	7034	8390	3429	1260	6455	7236	4836	6906	2406	6773	8684	7482	6974

Figura 22 – Matriz Todos os Pontos de Coleta Semanal - Parte 2

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	1828	1523	1413	5783	5147	3244	2691	3682	7493	10095	6153	7034
2	4149	4993	4351	4168	4355	1843	4064	1122	8843	11445	7503	8384
3	6982	7732	8013	11410	7182	9085	6393	8778	1681	2450	5105	3432
4	4094	4844	5125	8522	3988	6197	3505	5890	2164	4766	1679	1260
5	2265	1704	1434	3866	2472	1341	2180	1234	6959	9561	5619	6500
6	824	719	1008	5246	2839	2540	1683	2615	6498	9100	5158	6039
7	3702	3763	3588	6212	393	3888	3617	3581	6802	9404	4407	4836
8	1274	823	404	4288	3602	1617	2549	3007	7350	9953	6011	6892
9	3063	3813	4094	7491	3506	5166	2474	4859	3072	5675	1733	2614
10	1118	815	293	4615	3093	2064	1937	2501	6752	9355	5413	6294
11	2282	2040	1398	3244	4782	2270	4490	1963	9269	11871	7929	8810
12	1508	1228	624	3945	3499	1073	2783	1314	7584	10187	6245	7126
13	1768	1250	977	4746	4175	2068	2632	3465	7433	10035	6093	6974
14	0	603	884	5664	3256	2843	1115	3033	5930	8532	4590	5471
15	603	0	622	5111	3102	2573	1878	2878	6680	9282	5340	6221
16	884	597	0	4503	3214	1959	2159	2397	6961	9563	5621	6502
17	5319	5077	4435	0	5865	3352	5573	3046	10352	12954	9012	9893
18	3308	3370	3194	5819	0	3494	3224	3188	7195	9797	4801	5229
19	2524	2264	1640	3352	3540	0	3248	721	8027	10629	6687	7568
20	1115	1865	2146	5845	3438	3520	0	3214	4820	7422	3480	4361
21	3027	3871	3229	3046	3233	721	2942	0	7721	10323	6381	7262
22	5930	6680	6961	10358	6130	8033	5341	7726	0	3257	3740	2378
23	8532	9282	9563	12960	8732	10635	7944	10329	3256	0	6342	4968
24	4569	5319	5600	8997	6590	6672	3981	6366	3154	5756	0	2695
25	5471	6221	6502	9899	5229	7574	4883	7268	2380	4983	3281	0

APÊNDICE D – Reagrupamento de *Clusters*

Como apresentado, o reagrupamento dos *clusters* semanais foi realizado através da obtenção de 3 medianas selecionadas pelo algoritmo de Teitz e Bart, enquanto que a designação dos pontos para cada mediana foram conseguidos a partir da aplicação do algoritmo de Gillet e Johnson modificado, resultando nas seguintes atribuições:

Tabela 7 – Reagrupamento de *Clusters*

Mediana	n	Designação
Quarta - Feira n = 24 PEDRINHAS (UBS) (7)	2	PARAIBINHA (UBS) (0)
	3	VICENTE BALDOINO (UBS) (1)
	6	IPUEIRAS 2 (UBS) (2)
	17	SAMU (3)
	21	CONDURU (UBS) (4)
	22	PANTANAL (UBS) (5)
	23	PARQUE DE EXPOSIÇÃO (UBS) (6)
Quinta - Feira n = 15 IPUEIRAS 1 (UBS) (6)	5	CTA (0)
	9	ANTENOR NEIVA (UBS) (1)
	10	CANTO DA VARZEA (UBS) (2)
	11	PAROQUIAL (UBS) (3)
	13	BOA SORTE (UBS) (4)
	14	FREI DAMIÃO (5)
	19	CATAVENTO (UBS) (7)
Sexta - Feira n = 20 CECILIA NERI (UBS) (7)	0	BOA VISTA (UBS) (0)
	1	MORADA DO SOL (UBS) (1)
	4	BELINHA NUNES (UBS) (2)
	7	MALVINAS (UBS) (3)
	16	BELO NORTE (UBS) (4)
	12	PASSAGEM DAS PEDRAS (UBS) (5)
	18	AEROLANDIA (UBS) (6)

O valor de n apresentado na tabela é referente à posição deste vértice na matriz exposta no Apêndice C. O número entre parênteses representa o identificador daquele ponto no seu novo *cluster*. Sendo que o ponto de partida e chegada (a empresa) sempre será identificada pelo número 8.

APÊNDICE E – Rota Quinzenal (1)

A rota denominada como Quinzenal (1) que é designada para coleta aos sábados (quinzenalmente, um sábado sim e outro não), obteve em seu processo de otimização resultados que não reduziram os custos da rota atualmente empregada pelo veículo coletor. A ordem atual de visitação dos pontos de coleta é definida pelos funcionários com base em seus conhecimentos empíricos, desta maneira, ressaltamos a importância da experiência do motorista e sua capacidade de escolher os roteiros sem nenhum apoio computacional. Portanto, como não foram obtidas melhorias, esta rota não compôs as estatísticas dos resultados.

Na Tabela 8 pode-se observar os resultados obtidos pelas heurísticas e também a rota atual.

Tabela 8 – Resultados Obtidos para Rota Quinzenal (1)

	Roteirização	Tempo	Distância
VMP (tempo)	13-3-9-2-1-11-4-6-8-0-7-5-12-10-13	196 min	127,5 km
VMP (distância)	13-3-2-9-1-11-4-8-0-7-5-6-12-10-13	185 min	117,1 km
IMD (tempo)	13-12-10-3-9-2-1-7-0-8-5-4-11-6-13	177 min	110,6 km
IMD (distância)	13-10-12-3-9-2-1-7-0-8-5-4-11-6-13	176 min	110,6 km
ATUAL	13-9-3-2-1-7-0-8-5-4-11-6-12-10-13	171 min	108,5 km



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL NA BIBLIOTECA
“JOSÉ ALBANO DE MACEDO”**

Identificação do Tipo de Documento

- () Tese
- () Dissertação
- (X) Monografia
- () Artigo

Eu, **AMAND A GONÇALVES BERNARDES,** autorizo com base na Lei Federal nº 9.610 de 19 de Fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973 de 02 de dezembro de 2004, a biblioteca da Universidade Federal do Piauí a divulgar, gratuitamente, sem ressarcimento de direitos autorais, o texto integral da publicação **Abordagem de pesquisa operacional aplicada na otimização de rotas de coleta de lixo hospitalar na cidade de Picos – PI,** de minha autoria, em formato PDF, para fins de leitura e/ou impressão, pela internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Picos-PI 11 de JANEIRO de 2019.

A assinatura manuscrita de Amanda Gonçalves B. é escrita em azul sobre uma linha horizontal preta. O nome 'Amanda Gonçalves B.' é claramente legível na caligrafia.

Assinatura