

# Análise crítica das rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos no bairro centro do município do Crato/CE

*Critical analysis of urban solid waste collection routes in the centro district of Crato/CE*

• **Data de entrada:**  
18/01/2018

• **Data de aprovação:**  
20/07/2018

Valquiria Melo Souza Correia<sup>1\*</sup> | Marisete Dantas de Aquino<sup>1</sup> |  
Antonio Clecio Fontelles Thomaz<sup>2</sup> | Márcilio Luís Viana Correia<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.016>

## ORCID ID

Correia, V. S. C.  <https://orcid.org/0000-0001-9155-345X>  
Aquino, M. D.  <https://orcid.org/0000-0002-4940-3607>

Thomaz, A. C. F.  <https://orcid.org/0000-0002-2899-1569>  
Correia, M. L. V.  <https://orcid.org/0000-0003-0245-8923>

## Resumo

O estudo tem o objetivo de minimizar as distâncias percorridas pelo caminhão de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos pelos responsáveis por realizar a coleta de lixo, que devem percorrer todas as ruas (arcos) do bairro Centro, no município do Crato/CE, apresentando um modelo de otimização para a melhoria do gerenciamento de coleta e transporte de resíduos sólidos. Para a realização desta pesquisa, foram consideradas as rotas dos caminhões de coleta convencional, que é realizada em dias e horários alternados da semana, pré-estabelecidos pela equipe de trabalho. Para isso, a empresa utiliza dois caminhões compactadores homogêneos (cada um com capacidade entre 9 a 12 toneladas). O processo heurístico do estudo de caso será desenvolvido pelo Problema do Carteiro Chinês Não Orientado, que possui como característica fazer o emparelhamento de nós de um grafo não direcionado. Conclui-se que as rotas otimizadas permitem verificar que uma redução de 10% na distância total percorrida pode proporcionar uma economia de R\$ 34.000,00/mês referente a gastos de manutenção e combustíveis dos veículos.

**Palavras-chave:** Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos. Análise crítica de rotas. Problema do Carteiro Chinês. Otimização.

## Abstract

*The study has the objective of minimizing the distances travelled by the collection truck and the transportation of solid urban waste by those responsible for collecting garbage, which must cover all the streets (arches) of the Centro district in the municipality of Crato/CE, introducing an optimization model for improving the management of solid waste collection and transportation. In order to carry out this research, the conventional collection truck routes were considered, which are performed on alternate days and times of the week, pre-established by the work team. For this, the company uses two homogeneous compactor trucks (each one with capacity between 9 to 12 tons). The heuristic process of the case study will be developed by the Unmanned Chinese Postman Problem, which has the characteristic of pairing nodes of an uncorrected graph. It is concluded that the optimized routes allow to verify that a reduction of 10% in the total distance travelled can provide savings of R\$ 34.000,00 / month referring to maintenance and fuel costs of the vehicles.*

**Keywords:** Collection of Urban Solid Waste. Critical route analysis. Chinese Postman's Problem. Optimization.

<sup>1</sup> UFC (Universidade Federal do Ceará). Fortaleza - CE - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza - CE - Brasil.

<sup>3</sup> Ufersa (Universidade Federal Rural do Semi-Árido). Mossoró - RN - Brasil.

\* **Autor correspondente:** [valquiriamelosouza@hotmail.com](mailto:valquiriamelosouza@hotmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

A coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um serviço público prestado pela prefeitura de quase todas as cidades brasileiras. De acordo com os dados da Abrelpe (2017), o total de RSU gerados no Brasil aumentou cerca de 1,3% entre os anos de 2014 e 2015. Isto é, passou de 78,6 milhões de toneladas para 79,9 milhões de toneladas, de modo que, no mesmo período, a população cresceu 0,8% e o Produto Interno Bruto (PIB) retraiu 3,8%. Ainda segundo a Abrelpe, esse aumento da natalidade e o consumo de materiais descartáveis são os dois principais fatores para o aumento da geração de RSU.

Em alguns municípios que possuem aterros sanitários, estes se situam bem distantes dos centros urbanos. Desse modo, o serviço passa a ser realizado em algumas etapas que, em geral, compreendem: a coleta domiciliar, o transbordo, o tratamento numa estação apropriadamente localizada, e o transporte para o destino final. Nesse aspecto, há uma complexidade, e consequentes gastos que envolvem este serviço. Em alguns outros municípios, os resíduos coletados pelos caminhões têm como destino final, após a rota realizada, o lixão.

Portanto, com a aplicação da modelagem CPP (Problema do Carteiro Chinês), tendo como proposta a minimização do percurso, há uma economia financeira significativa que não se restringe somente ao bairro em estudo, mas também para a prefeitura e para a empresa que faz a coleta convencional, a qual terá a minimização das rotas percorridas pela equipe de trabalho, em relação ao tempo de duração da coleta dos resíduos sólidos e limpeza dos espaços públicos. Assim, com a minimização, poderá contabilizar menores gastos com o combustível, o desgaste do veículo e a mão de obra.

O sistema de coleta de RSU apresenta complexidade, importância e custo, sendo esta uma tare-

fa essencial da Administração Pública (BARROS, 1999). Contudo, na maioria das vezes, a preocupação da administração municipal está somente em afastar os RSU da fonte geradora, não se importando, necessariamente, com uma destinação final sanitariamente adequada. Isso em virtude da ausência de dados e informações contundentes que especifiquem e caracterizem os resíduos sólidos municipais e possibilitem uma gestão eficiente deles (SILVA, 2014).

A problemática relacionada à roteirização periódica em arcos capacitados consiste na teoria dos grafos. Segundo Ore (1990), essa teoria surgiu devido ao anseio de Euler em resolver o problema da ponte de Königsberg. Assad e Golden (1995) consideram que Euler identificou a origem da teoria dos grafos com o clássico problema das sete pontes que atravessam o Rio Pregel em Königsberg, publicado por ele em 1736.

De acordo com Deluqui (1998), a otimização do processo de coleta de resíduos sólidos urbanos deve buscar a máxima satisfação da população com a prestação de serviços, por meio da adequada consideração dos aspectos de qualidade, custos, atendimento e proteção à saúde pública. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça um controle operacional dos serviços prestados que permita a avaliação dos mesmos.

O estudo tem como objetivo minimizar as distâncias percorridas pelo caminhão de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos quanto às distâncias percorridas pelos responsáveis pela limpeza de rua, que devem percorrer todas as ruas (arcos) do bairro Centro, no município do Crato/CE.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os problemas acerca da “otimização de redes” incluem aplicações tradicionais. Ou seja, trata-se de encontrar a maneira mais eficiente de

relacionar diversas localidades, direta ou indiretamente, encontrando o caminho mais curto entre dois nós e propondo o fluxo máximo em uma rede (os nós conectados por ramificações) de modo que satisfaça os requisitos de suprimentos e a demanda em diferentes locais, programando as atividades de um determinado projeto.

Alguns pesquisadores, como Colin, Cipparrone e Shimizu (1999), Cunha (2000) e Paes (2004), revelam que quando se dispõe de uma “otimização de rotas” consideram-se os ganhos que se obtém com a redução do custo de transporte, além da satisfação do usuário que irá desfrutar de uma categoria de serviço bem mais eficiente.

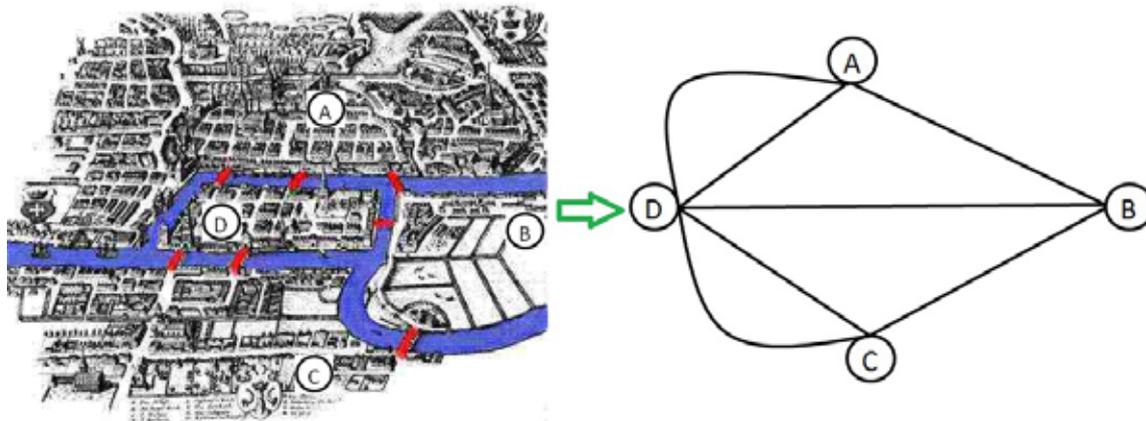
Uma rede consiste basicamente em um conjunto de nós conectados por arcos (ou ramos). Seguindo uma notação em rede, tem-se:  $(N, A)$ , onde  $N$  é o conjunto de nós e  $A$  é o conjunto de arcos. Um arco é orientado ou dirigido se ele permitir um fluxo positivo em uma direção, e um fluxo zero na direção oposta. Desse modo, uma rede orientada é aquela na qual todos os arcos são orientados. Quanto ao caminho, trata-se de uma sequência de arcos distintos que ligam dois nós passando por outros nós, independentemente da direção de fluxo em cada arco. Assim, um caminho forma

um ciclo ou um *loop* se for conectado um nó a si mesmo, passando por outros nós.

Uma rede conectada é quando uma rede tem todos os pares de nós ligados por no mínimo um caminho. Já uma árvore é uma rede conectada sem ciclos, formada por um subconjunto de todos os nós e por uma árvore geradora que consiste em uma árvore que interliga todos os nós da rede.

Assim sendo, a problemática das sete pontes pode ser definida quando um determinado indivíduo é capaz de, a partir de um determinado ponto, percorrer cada uma das sete pontes exatamente uma vez e voltar ao ponto de origem. A questão é que o problema poderia ser resolvido por tentativa e erro, porém Euler desenvolveu um mecanismo mais decisivo correspondente a um grafo qualquer (ASSAD; GOLDEN, 1995). Ou seja, Euler conduziu o problema da seguinte forma: considerando o questionamento de que se for possível percorrer o diagrama a partir de qualquer um dos pontos  $A, B, C$  ou  $D$ , usando os arcos apenas uma vez, e voltar ao ponto de início a solução é negativa, isto porque o grafo não contém a trilha de Euler, e desse modo não há possibilidade de percorrer as sete pontes de uma única vez voltando ao ponto de partida.

Figura 1: Caracterização das 7 pontes num Grafo por Euler



FONTE: GOMES et al. (2009), modificado pelo autor (2018).

Cada “caminho fechado” que percorre todos os arcos de um grafo somente uma vez foi denominado “caminho” ou “roteiro de Euler”. Um grafo que consiste de um caminho fechado de Euler é um grafo de Euler (NETTO, 2001).

Segundo Goldberg e Luna (2000), o problema do carteiro chinês é considerado um problema onde um grafo  $G(N, A)$ , cujos arcos  $(i, j)$  possuem um comprimento não negativo, e se objetiva identificar um caminho de menor comprimento, onde ele possa iniciar em algum vértice e passar por todas as arestas, pelo menos uma vez, retornando ao vértice inicial. A problemática do carteiro chinês divide-se conforme o tipo de orientação a que se propõe resolver, sendo eles: os grafos (também chamados de circuitos) direcionados, os não direcionados e os mistos (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Alguns autores consideram que a roteirização consiste em projetar um conjunto de rotas com o propósito de minimizar custos no atendimento de um grupo de clientes que estejam geograficamente dispersos, satisfazendo as restrições operacionais (BRÄYSY et al., 2009; PILLAC et al., 2012). No entanto, existem diferentes maneiras de alcançar a redução de custos. Alguns autores tratam da redução do tempo da rota (TEIXEIRA et al., 2004); da redução das distâncias (DAS; BHAT-TACHARYYA, 2015; SANJEEVI; SHAHABUDEEN, 2016); da redução de tempo de espera e de quantidade de veículos (QURESHI et al., 2009); e da redução da quantidade de rotas e de distância (RAMOS et al., 2013). Para outros pesquisadores, como Brasileiro e Lacerda (2008) e Khan e Samadder (2016), a roteirização é otimizar conjuntamente a distância e tempo de rota.

De acordo com Deluqui (1998), a otimização do processo de coleta de resíduos sólidos urbanos deve buscar a máxima satisfação da população com a prestação de serviços, por meio da adequada consideração dos aspectos de qualidade,

custos, atendimento e proteção à saúde pública. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça um controle operacional dos serviços prestados que permita a avaliação dos mesmos.

Para Kim et al. (2006), a minimização do número de veículos e o tempo da rota compõem a roteirização, mas eles consideram ainda a capacidade da rota, isto é, trabalham no processo de diminuição do número de cruzamentos entre as vias.

Problemas de roteirização de veículos (*Vehicle Routing Problems - VRPs*) são de natureza combinatória e fazem parte de uma categoria ampla de problemas de pesquisa operacional, conhecida como problemas de otimização de rede. Nessa categoria encontram-se problemas clássicos, como problema de fluxo máximo, problema do caminho mínimo, problema de transporte, problema de designação (GOLDEN; BALL; BODIN, 1981).

Para Cunha (1997), a roteirização de veículos, embora não identificada nos dicionários de língua portuguesa, é uma maneira que vem sendo empregada como equivalente ao inglês “*routing*” (ou “*routeing*”), que aponta o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem atendidos por veículos de uma frota, que são visitados em pontos geograficamente dispersos, como em locais pré-determinados, mas que necessitam de atendimento (CUNHA, 2000).

O primeiro trabalho relacionado ao estado da arte que trata da modelagem de problemas de roteirização e programação de veículos e tribulações foi retratado por Bodin et al. (1983), que ainda é referência no assunto, tendo em vista que os problemas de roteirização podem ser do tipo roteirização pura ou de roteirização e programação. Para problemas de roteirização pura, as condicionantes temporais não são importantes para a definição dos roteiros e das sequências de coletas e entregas, mas os aspectos espaciais

da localização dos pontos a serem atendidos, objetivando construir roteiros viáveis a um menor custo possível. Com relação aos problemas de roteirização e programação, estes acontecem em situações em que estão presentes restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo).

Segundo Arelanes et al. (2007), as soluções que resultam em rotas de menor custo, distância ou tempo, devem partir de um, ou mais, depósitos para certas quantidades de clientes, mas que estejam sujeitos a restrições adicionais (ARELANES et al., 2007).

Para Goldbarg (2000), os problemas de roteamento, em geral, poderiam ser classificados em duas grandes classes:

- Roteamento em Grafos e Roteamento de Veículos.
- Roteamento de Grafos, constituída pelas seguintes subclasses:
  - 1) Problema de Roteamento de Nós (associados aos ciclos Hamiltonianos);
  - 2) Problemas de Roteamento de Arcos (associados aos ciclos Eulerianos).

Desse modo, as subclasses, apresentadas por Goldbarg (2000), consideram que o problema de coleta de resíduos sólidos se caracteriza como um problema de roteamento de arcos, por necessitar da formação de um ciclo Euleriano em que o caminhão de coleta deve passar por todos os arcos uma única vez.

Hall e Partyka (2000) consideram que a roteirização são as decisões, os objetivos e as restrições. Assim, tomar uma decisão consiste em atribuir ao grupo de clientes as sequências e programações de visitas. Quanto aos objetivos, estabele-

cem o nível de serviço que se deseja fornecer, e as restrições seriam as limitações de recursos e tempo impostas pelos atores envolvidos.

Para Ribeiro e Campos (2001), o problema da roteirização e do sequenciamento busca encontrar uma rota de passagem pelos pontos em estudo e uma programação de horários relacionada a cada rota. Assim, deve-se encontrar a melhor sequência de passagem por uma série determinada de pontos respeitando um determinado horário, de modo que a sequência esteja apresentada de forma gráfica ou por tabelas.

Segundo Daskin (1995), os modelos de roteirização abordam técnicas de definição do caminho ótimo (encontrar a rota ótima obedecendo às restrições e minimizando distâncias e custos), cobertura de vias (obter o caminho mínimo, de modo que todas as vias sejam percorridas pelo menos uma vez, caso típico do problema do Carteiro Chinês) e cobertura de nós (partir de um determinado ponto, visitar cada ponto da rede ao menos uma vez e retornar ao ponto de origem, problema do Caixeiro Viajante), uma vez que os algoritmos de solução exigem um aperfeiçoamento contínuo agregando elementos que demonstrem as operações reais.

Bodin et al. (1983) e Dejax e Haouri (1991) fazem uma tipologia dos problemas de roteirização, onde apresentam um panorama com modelos. Laporte (1992,1993) descreve em seus estudos alguns métodos baseados em processos heurísticos de roteirização. Witucki, Dejax e Touati (1994) construíram um sistema de tomada de decisão definindo a metodologia nos planos estratégico, tático e operacional para solucionar um problema de roteirização de veículos para uma empresa de distribuição na área de produtos alimentícios congelados.

Alguns pesquisadores classificam a coleta de resíduos sólidos como mostrado no Quadro 1.

**Quadro 1:** Caracterização das 7 pontes num Grafo por Euler

Esferas	Autores	Tipo
Coleta de resíduos urbanos	Brasileiro e Lacerda, 2008; Das e Bhattacharyya, 2015; Ghose et al., 2006; Hiramatsu et al., 2009; Khan e Samadder, 2016; Kim et al., 2006; Sanjeevi e Shahabudeen, 2016	Caracterizada pela coleta de todo resíduo urbano
Coleta de resíduos recicláveis	Teixeira et al., 2004; Wilson e Williams, 2007	Normalmente vinculada a coleta de plástico, papel, vidro e metal
Coleta de resíduos orgânicos	Gredmaier et al., 2013	Orgânicos

Dois tipos são destacados pela roteirização da coleta de resíduos sólidos urbanos: de porta a porta (BRASILEIRO; LACERDA, 2008; DAS; BHATTACHARYYA, 2015) e *drop-off* (TEIXEIRA et al., 2004; KHAN; SAMADDER, 2016). Para a coleta porta a porta, os resíduos ficam nas ruas e calçadas; nesse caso é necessário que o caminhão passe por todas as ruas, proporcionando um problema de rota em arco (RAMOS et al., 2013). Já na coleta *drop-off*, há a presença de pontos de entrega de fácil acesso para sejam levados os resíduos, centrais que armazenam temporariamente os resíduos e que depois um veículo coletor passa em todos os pontos e centrais de entrega, tornando-o um problema de rota de nó (RAMOS et al., 2013).

Gredmaier et al. (2013) comparam as duas formas de coleta de resíduos residenciais com um resultado de consumo de combustível muito menor para a coleta *drop-off*. Da mesma maneira, a coleta de resíduos comerciais também é dividida em porta a porta (KIM et al., 2006; RAMOS et al., 2013) e *drop-off*. Sanjeevi e Shahabudeen (2016)

abordam a integração dos sistemas de coleta de resíduos comerciais e residenciais por *drop-off*.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa realizada foi sobre a coleta dos resíduos sólidos no município do Crato, terceira cidade mais desenvolvida do estado do Ceará em número de residentes e o 9º maior PIB do Estado (IBGE, 2010). Tem uma população de 121.428 habitantes (100.937 na zona urbana e 20.525 na zona rural), distribuídos em uma área total de 1.176,467 km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 94,05 hab./km<sup>2</sup>.

Para a realização desta pesquisa, foram consideradas as rotas dos caminhões de coleta convencional no bairro Centro da Cidade (Fig. 2), realizada diariamente e em horários alternados da semana, pré-estabelecidos pela equipe de trabalho. Para isso, a empresa utiliza dois caminhões compactadores (cada um com capacidade entre 9 a 12 toneladas).



O processo heurístico do estudo de caso será desenvolvido para o Problema do Carteiro Chinês Não Orientado, que possui como característica fazer o emparelhamento de nós de um grafo não direcionado.

Quanto à metodologia do estudo de caso, foi utilizada a metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), que se destina a solucionar o PCC em grafos mistos  $G = (V, A \cup E)$ , que são grafos formados por um conjunto de arestas  $E$  (uma abstração de ruas de sentido duplo) e um conjunto de arcos  $A$  (uma abstração de ruas de mão-única) e que apresentam modelos em que a solução para resolver o PCC são grafos NP-Completo, em que os algoritmos de eficiência polinomial não existem para uma solução.

A proposta do algoritmo baseado na metaheurística GRASP consiste em duas fases essenciais, ou seja, fase de construção e fase de busca local.

A fase de construção representa uma orientação para as arestas do grafo com o propósito de obter um grafo direcionado, usando um algoritmo para resolver o Problema de Fluxo de Custo Mínimo (PFCM); desse modo, torna o grafo simétrico.

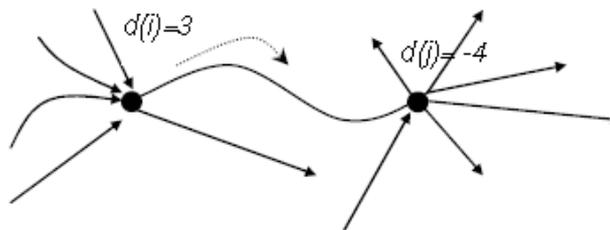
O passo a passo dessa construção ocorre quando se inicia com uma relação de arestas não-orien-

tadas ( $U$ ), que apresenta todas as arestas do grafo ( $U = E$ ). A partir da identificação, uma aresta é selecionada aleatoriamente e orientada. A formação do conjunto de arestas orientadas será apresentada por  $E_d$ . Após essa etapa, a execução  $d(v)$  será a diferença que ocorre entre o número de arcos e arestas orientadas que entram em  $(v)$  e o número de arcos e arestas orientadas que saem de  $v$ , isto é,  $d(v) = d(v) - d(v)$ . A proposta é que  $d(v)$  é considerado o grau do vértice  $v$ , onde  $d(v) > 0$  mostrará que existe uma oferta no vértice  $v$ ,  $d(v) < 0$  mostrará a existência de demanda, e quando  $d(v) = 0$  mostrará que  $v$  representa um vértice de passagem.

Com relação à função de avaliação gulosa  $w(i,j)$  de uma aresta qualquer  $(i,j)$ , descreve a conveniência de orientá-la para que se aproxime o grafo de um grafo simétrico, caso contrário o grafo pode se tornar mais distante de um grafo simétrico.

Segundo Paes (2004), o valor de  $w(i,j)$  para determinada aresta  $(i,j)$  será o seu peso. Assim, ao se considerar, por exemplo, uma aresta  $(i,j)$  tal que  $d(i) = 3$  e  $d(j) = -4$ . A determinação mais apropriada para  $(i,j)$  consiste de  $i$  para  $j$ , e não de  $j$  para  $i$  (Fig. 3). No entanto, no caso  $d(i) = 2$  e  $d(j) = 2$ , não há um sentido mais apropriado que outro, logo a orientação será aleatória.

**Figura 3:** Orientação de uma aresta fase de construção GRASP



Fonte: PAES (2004).

Dessa maneira, a definição para a função  $w(i, j)$ , da aresta  $(i, j)$ . No caso de um número positivo muito pequeno, podem-se considerar os seguintes casos:

Caso 1: se  $d(i).d(j) > 0$  então  $w(i, j) = -|d(i) + d(j)|$ .

Caso 2: se  $d(i).d(j) < 0$  então  $w(i, j) = |d(i) - d(j)|$ .

Caso 3: se  $d(i)=0$  e  $d(j)=0$  então  $w(i, j) = -e$ .

Caso 4: se  $d(i)=0$  ou  $d(j)=0$  então  $w(i, j) = e$ .

Outro aspecto consiste que após os pesos  $w(i, j)$  serem calculados, o conjunto  $U$  é organizado em ordem decrescente de pesos  $w$ , e para cada passo da fase de construção uma aresta é escolhida entre os elementos da relação restrita do GRASP, em que se repete esse processo até que todas as arestas sejam orientadas e o grafo  $G_s$  seja simétrico.

A fase de busca local do estudo consiste na identificação em  $G_s$  se houver mais de dois pares de arcos orientados em sentidos opostos, adjacentes aos mesmos vértices. No entanto, quando existir excesso de pares, os mesmos devem ser removidos, desse modo ocorrerá redução do custo do percurso do carteiro, que não provocará modificações nas características do grafo.

O problema de roteirização de veículos representa definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, cada um dos quais iniciando e terminando no depósito ou base dos veículos, assegurando, dessa forma, que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e que a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende (LAPORTE et al., 2000).

O caminhão coletor passa por todos os pontos de coleta de resíduos que estão situados nas ruas, de modo que há mais de um ponto de coleta em uma determinada rua, conforme o Quadro 2. A Fig. 4 mostra a disposição das ruas em mapa.

**Quadro 2:** Ruas do bairro Centro a serem percorridas

1	R. ZACARIAS GONCALVES
2	R. MADRE ANA COUTO
3	TRAV. JUAZEIRO DO NORTE
4	R. ALMIRANTE ALEXANDRINO
5	R. MONS. ESMERALDO TEIXEIRA
6	R. PADRE FROTA
7	R. BARBARA DE ALENCAR
8	R. MONS. FRANCISCO ASSIS FEITOSA
9	R. JOSE DE ALENCAR
10	AV. DUQUE DE CAXIAS
11	R. PADRE SUCUPIRA
12	BECO PADRE LAURO
13	R. VICENTE LEMOS
14	TRAV. IDA BILHAR
15	R. RODOLFO TEOFILO
16	R. JOAO BACURAU
17	R. MONS. SOTTER
18	R. CORONEL SEGUNDO
19	R. RUI BARBOSA
20	R. DA PENHA
21	R. ARARIPE
22	AV. JOSE ALVES DE FIGUEIREDO
23	R. RATISBONA
24	R. NELSON ALENCAR
25	R. MONS. TAVARES
26	R. CURSINO BELEM
27	R. DR. JOAO PESSOA
28	R. MIGUEL LIMA VERDE
29	R. SENADOR POMPEU
30	R. TRISTAO GONCALVES
31	R. SANTOS DUMONT
32	R. JOSE CARVALHO
33	R. DOM PEDRO II
34	R. LOIOLA ALENCAR
35	R. AUGUSTO BACURAU
36	R. DOM QUINTINHO
37	R. JOSE MARROCOS
38	R. LEANDRO BEZERRA
39	R. SONIA
40	R. CORONEL TEOFILO SIQUEIRA
41	VILA SANTA HELENA
42	R. CORONEL LUIS TEIXEIRA
43	PRAÇA JUAREZ TÁVORA.
44	PRAÇA DA SÉ
45	PRAÇA SIQUEIRA CAMPOS
46	R. BRUNO DE MENESES
47	R. CAROLINA SUCUPIRA
48	R. HERMENEGILDO FIRMEZA
49	R. GETÚLIO VARGAS
50	R. TEODORICO TELES
51	R. MONS. JOVINIANO BARRETO
52	R. CORONEL RAIMUNDO LOBO
53	R. ANDRÉ CARTAXO
54	PRAÇA FRANCISCO SÁ
55	R. HORÁCIO JACOME
56	R. SAGRADA FAMILIA
57	R. DESEMB. EDMILSON CRUZ NEVES
58	R. CORONEL ANTONIO LUIZ
59	R. CORONEL SIQUEIRA

Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 4:** Ruas do bairro do Centro dispostas em mapa

Fonte: Google Earth (2017).

A Fig. 5 apresenta o grafo após a animação do percurso que foi tomado para resolver o problema. Trata-se de um grafo não euleriano, de modo que será necessário realizar as devidas operações para determinar um percurso ótimo para o grafo.

#### 4 RESULTADOS

Após o trajeto com o caminhão, a solução da rota é composta por rotas ótimas, uma para cada viagem/dia. Cada rota realizada tem início na garagem, mas ela de fato se inicia na entrada do bairro (nó 1) e no término na saída do bairro (nó 140)

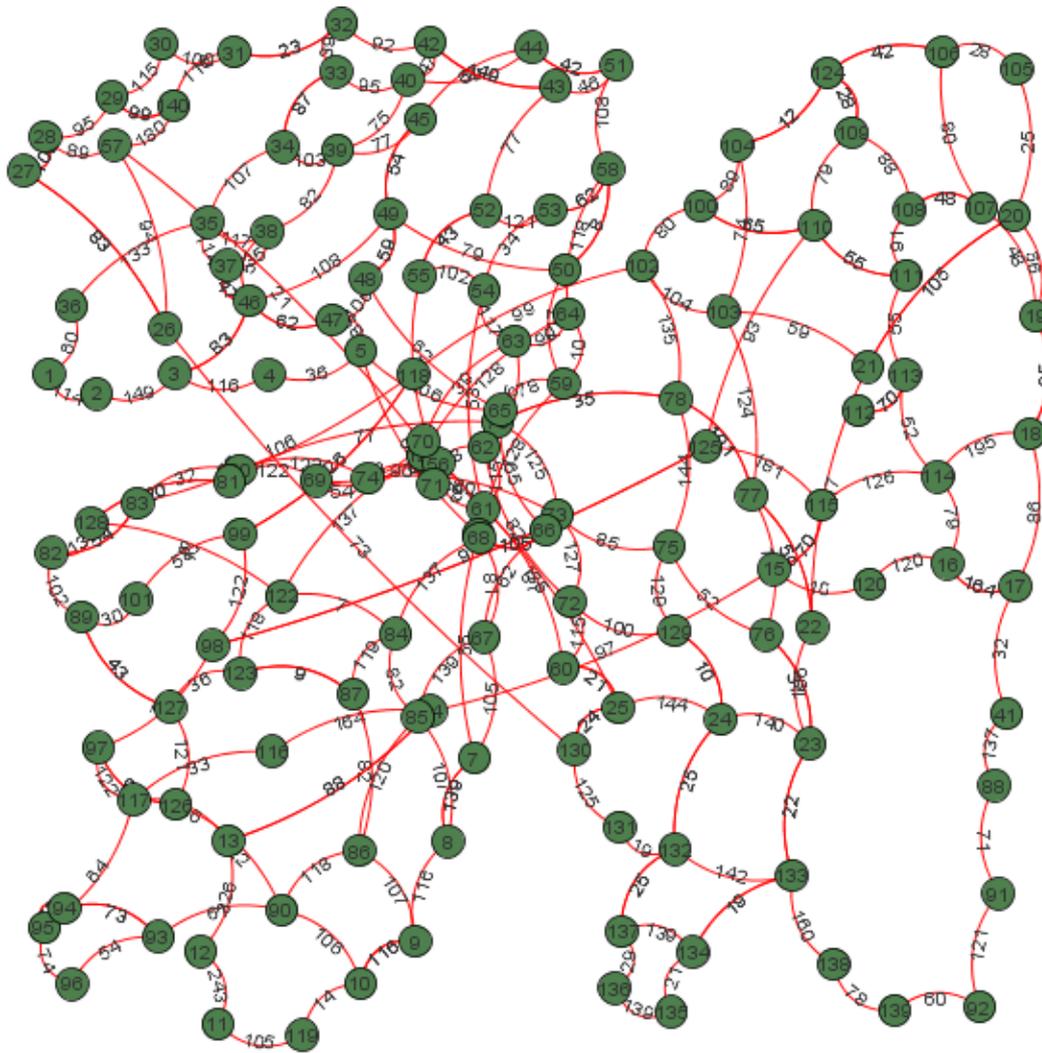
com destino ao lixão, que se encontra a aproximadamente 6 km de distância do nó número 36.

O grafo que constitui a rota pesquisada é composto por 140 nós e 270 arestas, que são percorridas pelo caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos, perfazendo uma distância de 19.241m.

Todos os pontos de coleta foram visitados, e todo o resíduo disposto coletado (por um único caminhão em cada dia e horário). Como não há balança na entrada do lixão, o quantitativo estimado de coleta de RSU por viagem é igual à capacidade do caminhão compactador.

Na Fig. 5 podem-se observar as rotas geradas pelo caminhão no bairro Centro, por meio do grafo.

**Figura 5:** Grafo Final do Estudo de Caso



O grafo possui todos os vértices e arestas coloridos, pois todos foram visitados durante o percurso do caminhão de coleta dos RSU. Todavia, ao executar o algoritmo, foram obtidos os resultados mostrados no Quadro 3.

**Quadro 3:** Resultados

<b>Tipo de PCC</b>	Não Dirigido
<b>Método de Resolução</b>	Modelo de Programação Linear
<b>Arestas Duplicadas</b>	{(3,46), (6,66), (7,8), (9,10), (13,14), (15,115), (16,17), (18,19), (20,21), (22,77), (23,76), (23,133), (24,132), (24,129), (25,60), (25,130), (26,27), (27,28), (29,140), (31,32), (33,34), (37,46), (42,43), (44,51), (45,49), (46,47), (48,49), (50,58), (52,55), (53,58), (70,71), (77,78), (78,79), (81,128), (82,83), (87,123), (89,127), (93,94), (94,95), (97,126), (98,125), (99,118), (100,110), (104,124), (106,124), (107,108), (109,124), (110,111), (112,113), (132,137), (133,134)}
<b>Soma das Arestas Duplicadas</b>	2.829
<b>Número de Arestas do Grafo</b>	270
<b>Soma das Arestas do Grafo</b>	21.168
<b>Tempo de Execução (s)</b>	0,018

Os números representam os vértices e as arestas que formam os arcos a serem atravessados pelo veículo de coleta de resíduos sólidos no bairro Centro, Município do Crato.

Quanto aos dados da distância atual da rota, tem-se 36.680 metros, aproximadamente 40 km em um percurso realizado pelo caminhão de coleta convencional de resíduos sólidos urbanos, enquanto a distância otimizada é de 19.241 metros, aproximadamente 20km. Assim, a economia entre a distância otimizada e a distância atual é de aproximadamente 48%.

Fazendo uma simulação de valores, segue o seguinte raciocínio: considerando o preço médio de venda do diesel por litro de R\$ 4,02, segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo), entre os dias 20/05 a 26/05/2018, no município do Crato tem-se:

**Tabela 1:** Simulação do Consumo de Combustível da Rota Centro

Item	Atual	Otimizado
Rota (Km)	36,68	19,24
Consumo (Km/L)	4	4
Preço do Diesel dia (R\$) *	4,02	4,02
Valor da rota dia (R\$)	589,81	309,38
Valor da rota mês (R\$) **	17.694,30	9.281,40
Valor da rota ano (R\$) ***	215.280,65	112.923,70

\* ANP; \*\* 30 dias; \*\*\* 365 dias

Fonte: Elaborado pela autora.

O resultado foi bastante expressivo porque, geralmente, os municípios não possuem qualquer instrumento de controle de rotas para as coletas de lixo convencional, como é o caso do município em estudo, em que há uma sobreposição de percursos.

Desse modo, por meio da metodologia do PCC, otimiza-se a rota para passar o mínimo de vezes em cada rua.

## 5 CONCLUSÃO

O modelo do PCC, baseado no modelo de Edmonds (1973), constrói uma arborescência, em que o circuito euleriano consiste em uma tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler. O resultado obtido é oriundo da associação do trabalho de campo e do modelo do PCC; devido à limitação da quantidade de nós e arestas, o modelo se tornou não-dirigido. Quanto às rotas otimizadas, ao serem comparadas com as realizadas, proporcionam uma redução na distância total percorrida pelo veículo, o que pode acarretar uma economia significativa. Assim, os resultados mostram a possibilidade de uma economia aos cofres públicos, bem como ao meio ambiente e ao Município como um todo.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABREPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2017**. Disponível em [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2017/key\\_stats\\_2017.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2017/key_stats_2017.pdf). Acesso em: 27 dez 2017.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Sistema de Levantamento de Preços, 2018**. Disponível em [http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo\\_Por\\_Municipio\\_Posto.asp](http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Municipio_Posto.asp). Acesso em: 30 de maio 2018.
- ASSAD, A. A.; GOLDEN, B. L. Arc routing methods and applications. **Handbooks in Operations Research and Management Science**, v. 8, p. 375 – 483, 1995.
- BARROS, R.T.V. **Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte: Apostila da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.
- BODIN, L. D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and Operations Research**, v.10, n.2, p.63-211, 1983.
- BRASILEIRO, A. L.; LACERDA, G. M. Análise do uso de SIG no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidades de pequeno porte. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 2002, Vitória. **Anais...** Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/cndsiet.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2009.

- BRÄYSY, O.; DULLAERT, W.; NAKARI, P. The potential of optimization in communal routing problems: case studies from Finland. **Journal of transport geography**, v. 17, n.6, p.484-490, 2009.
- COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. G.; SHIMIZU, T. Otimização do Custo de Transporte na Distribuição-Armazenagem de Açúcar. **Rev. Produção**, v. 9, n.1, p. 23-30, Rio de Janeiro, 1999.
- CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**, v.8, n.2, p.51-74, 2000.
- DAS, S.; BHATTACHARYYA, B. K. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. **Waste Management**, n.43, p. 9-18, 2015.
- DEJAX, P., HAOUARI, M. (1991). La résolution des problèmes complexes de tournées de véhicules. In: Congrès International de Génie Industriel, 3., 1991, Tours Actes, 1991, p. 897-906. **Anais...**
- DELUQUI, K.K. **Roteirização para veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares utilizando um sistema de informação geográfica – SIG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) . Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 218 p. São Carlos. 1998.
- EDMONDS, J.; JOHNSON, E. L. Matching, Euler Tours and the Chinese Postman Problem, **Math. Program**. n.5, p. 88-124, 1973.
- GHOSE, M. K.; DIKSHIT, A. K.; SHARMA, S. K. A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. **Waste Management**, v.26, n11, p. 1287-1293, 2006.
- GOLDBARG, M. C; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 2000.
- GOLDBERG, D.E.; HOLLAND, J.H. Genetic algorithms and machine learning. **Machine learning**, Springer, v. 3, n.2, p. 95-99, 1988.
- GOLDEN, B.L.; BALL, M.; BONDIN, L. Current and Future Research Directions in Network Optimization. **Computers & Operations research**, v. 8, n. 2, p. 71-81, 1981.
- GREDMAIER, L.; RILEY, K.; VAZ, F.; HEAVEN, S. Seasonal yield and fuel consumed for domestic, organic collections in currently operational door-to-door and bring-type collection systems. **Waste and Biomass Valorization**, v.4, n.3, p. 683-693, 2013.
- HIRAMATSU, A.; HARA, Y.; SEKIYAMA, M.; HONDA, R.; CHIE-MCHAISRI, C. Municipal solid waste flow and waste generation characteristics in an urban-rural fringe area in Thailand. **Waste Management & Research**, v.27, n.10, p. 951-960, 2009.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014/2016). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- KHAN, D.; SAMADDER, S.R. Allocation of solid waste collection bins and route optimisation using geographical information system: A case study of Dhanbad City, India. **Waste Management & Research**, v.34, n.7, p.666-676, 2016.
- KIM, B.; KIM, S.; SAHOO, S. Waste collection vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**, v.33, n.12, p. 3624-3642, 2006.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms, **European Journal of Operational Research**, v.59, n.3, p.345-358, 1992.
- LAPORTE, G. **Recent Algorithmic Developments for the Traveling Salesman Problem and the Vehicle Routing Problem**. Montréal: Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, 1993. (Publication 932)
- ORE, O. **Graphs and their Uses**. 2 ed.. Washington: The Mathematical Association of America, 1990.
- PAES, G. F. **Otimização de rotas para coleta do resíduo doméstico: um tratamento GRASP do problema do carteiro chinês misto (PCCM)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia). Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, 2004.
- PILLAC, V.; GUÉRET, C.; MEDAGLIA, A. L. An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing. **Decision Support Systems**, n.54, p. 414-423, 2012.
- QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E.; YAMADA, T. An exact solution approach for vehicle routing and scheduling problems with soft time windows. **Transportation Research Part E**, v.45, n.6, p. 960-977, 2009.
- RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. Planning waste cooking oil collection systems. **Waste Management**, v.33, n.8, p. 1691-1703, 2013.
- RIBEIRO, G. M.; CAMPOS, V. B. G. Um Procedimento para Roteirização e Programação de Veículos Usando a Heurística de Ganhos para o Planejamento. In: SBPO, XXXIII, 2001, Campos do Jordão. Routing Systems Informática Ltda – Manual do RoadShow Módulos I e II, 2001. **Anais...**
- SANJEEVI, V.; SHAHABUDEEN, P. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. **Waste Management & Research**, v.34, n.1, p. 11-21, 2016.
- TEIXEIRA, J.; ANTUNES, A. P.; SOUSA, J. P. Recyclable waste collection planning - a case study. **European Journal of Operational Research**, v.158, n.3, p. 543-554, 2004.
- WILSON, C. D. H.; WILLIAMS, I. D. Kerbside collection: A case study from the north-west of England. Resources, **Conservation and Recycling**, v.2, n.2, p.381-394, 2007.
- WITUCKI, M.; DEJAX, P.; TOUATI, N. Le problème des tournées de véhicules dans une entreprise de transport et distribution: un exemple de modélisation. In: CONGRÈS INTERNATIONAL DE GÉNIE INDUSTRIEL, 1994, Montréal. Actes, 1994, p.1885-1894. **Anais...**