



# ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01  
de dezembro 2023

## Otimização de rotas para serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Canindé – CE

**Loana Karine Santos Vieira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

**Mateus Lima Matos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

**Luis Ruan da Silva Rocha**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

**Francisca Bianca Mendes Cunha**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

**Caio Augusto Nunes Marques**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

**Resumo:** A coleta de resíduos sólidos urbanos é uma atividade econômica com forte impacto no orçamento das cidades e na qualidade de vida da população. Assim, o presente estudo aborda a otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos em Canindé-CE, utilizando métodos de pesquisa operacional. O objetivo foi de gerar rotas alternativas àquela atualmente empregada pela empresa em um dos bairros da cidade. A partir disso foram aplicadas as heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso, além de encontrar a rota ótima. Todas as rotas apresentaram reduções superiores a 10% da distância total percorrida pelo caminhão de coleta, com a rota ótima proporcionando uma redução de 16,28% o que representaria uma estimativa de redução de custos da ordem de R\$ 976,41 no horizonte de um ano. Como trabalhos futuros sugere-se expandir a análise para contemplar todos os bairros da cidade e quantificar a redução de custos de manutenção dos veículos e a diminuição na emissão de gases do efeito estufa.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos, Otimização de rotas, Heurísticas.

## Optimization of routes for urban solid waste collection service in the city of Canindé – CE

**Abstract:** The collection of urban solid waste is an economic activity with a strong impact on cities' budgets and the population's quality of life. Thus, the present study addresses the optimization of solid waste collection routes in Canindé-CE, using operational research methods. The objective was to generate alternative routes to the one currently used by the company in one of the city's neighborhoods. From this, the nearest neighbor and inverse subcircuit heuristics were applied, in addition to finding the optimal route. All routes presented reductions of more than 10% in the total distance covered by the collection truck, with the optimal route providing a reduction of 16.28%, which would represent an estimated cost reduction of around R\$ 976.41 over the horizon. one year. As future work, it is suggested to expand the analysis to include all neighborhoods in the city and quantify the reduction in vehicle maintenance costs and the reduction in greenhouse gas emissions.

**Keywords:** Solid waste, Route optimization, Heuristics.

## 1. Introdução

O saneamento básico em cidades envolve a rota regular de veículos para a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) e posterior tratamento e destinação final adequada. Tal atividade é atribuída às prefeituras municipais para que seja mantida a limpeza e a saúde pública (MORO, 2014). Conforme informações apresentadas no relatório Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil observou-se que no período pós-pandemia aumentaram significativamente as demandas em todas as regiões do país, visto que o fluxo de pessoas nas ruas voltou a ser um a realidade, levando à geração de 81,8 milhões de toneladas de resíduos em 2022, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias (ABRELPE, 2022). A partir disso conclui-se que, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia, o que é um aumento significativo comparado a anos anteriores (ABRELPE, 2022). Com tal aumento surge uma grande demanda do serviço público de coleta de resíduos a fim de que tal serviço seja feito de forma adequada, eficaz e econômica.

A otimização de trajetos de veículos, como uma das aplicações da pesquisa operacional, visa minimizar as rotas, resultando na redução dos custos relacionados a essas viagens (TOTH; VIGO, 2014). Segundo Gansterer e Hartl (2018), os sistemas de otimização de trajetórias de veículos atualmente têm a capacidade de incorporar várias categorias de restrições, aumentando a precisão dos modelos matemáticos. Além disso, esses sistemas incluem recursos visuais e oferecem resultados significativos no contexto do processo decisório. Tais recursos oferecidos pela pesquisa operacional ajudam a otimizar rotas realizadas nos trajetos de coleta, visto que muitas vezes o percurso realizado não é o mais eficiente do ponto de vista econômico, e no caso da correção de rotas é gerado também uma diminuição de gastos. O custo anual de limpeza urbana e municipal no Brasil gira em torno de 17 bilhões de reais, dos quais uma parcela especial é direcionada para cobrir despesas relacionadas a equipamentos e pagamentos de funcionários (BRASIL, 2021).

A partir desse contexto o presente estudo tem como objetivo analisar as rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos em Canindé-CE, com o intuito de propor rotas mais eficientes. Tal serviço é prestado por uma empresa local que, além de ser uma empresa do ramo da construção civil, é também responsável pela coleta de resíduos sólidos da cidade a serviço da prefeitura municipal.

Para a realização do estudo foram levadas em consideração as rotas atualmente realizadas pelos veículos de coleta e, em seguida, foram propostas rotas alternativas utilizando as heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso. Além de tais métodos fez-se uso do software IBM CPLEX® para a modelagem e determinação da rota ótima para coleta dos RSU.

## 2. Referencial teórico

### 2.1. Pesquisa operacional

A pesquisa operacional (PO) surgiu na Inglaterra durante a segunda guerra mundial com a necessidade de tomar melhores decisões para resolver problemas táticos e estratégicos militares que surgiram naquele momento (BELFIORE; FÁVERO, 2013). A PO utiliza modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais para auxiliar na tomada de decisões de problemas mais simples aos mais complexos (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

De acordo com Hillier e Lieberman (2013) a pesquisa operacional busca constantemente a solução mais eficaz diante do problema definido, identificando o melhor caminho que deve ser percorrido. Sendo assim, a pesquisa operacional passou a ser utilizada em diversos

setores, podendo ser aplicada tanto na metalúrgicas, setores industriais, transportes e até na construção civil (ARENALES *et al.*, 2015).

## 2.2. Modelagem matemática de problemas de programação inteira

Um modelo matemático serve como uma representação de um problema real (ARENALES *et al.*, 2015). Ele deve conter informações suficientes para que possa ficar clara a essência do problema, porém de forma simples para que possam ser utilizados métodos e recursos computacionais para a resolução (ARENALES *et al.*, 2015).

De acordo com Belfiore e Fávero (2013) para realizar uma modelagem matemática é necessário estabelecer os seguintes elementos:

- a) Variáveis de decisão: são incógnitas, cujos valores são determinados por meio da resolução do modelo;
- b) Parâmetros: são valores conhecidos, constituindo dados de entrada dos modelos;
- c) Função objetivo: representa o sentido da otimização, podendo ser uma expressão que busca a maximização ou a minimização de um critério;
- d) Restrições: são um conjunto de equações e inequações que condicionam as variáveis de decisão que o modelo deve atender.

A programação linear é uma das técnicas mais aplicadas para resolução de problemas em Pesquisa Operacional (MEDEIROS *et al.*, 2017). Ela se torna mais atrativa pela simplicidade dos modelos matemáticos e da disponibilidade de métodos de resolução que podem ser executadas em computadores (MEDEIROS *et al.*, 2017). Ela representa uma área importante no campo da otimização, desempenhando um papel fundamental na resolução de diversos problemas práticos (SILVA, 2019). É um método que proporciona às empresas um suporte para a gestão de recursos e tempo, buscando a redução de custos e um aprimoramento dos resultados, sendo considerada uma das principais ferramentas estratégicas para quem procura uma excelência operacional (SILVA, 2019).

De acordo com Hillier e Lieberman (2013), em alguns problemas as variáveis de decisão têm sentido prático apenas se assumirem valores em uma escala discreta, o que caracteriza um problema de programação linear inteira ou otimização discreta (ARENALES *et al.*, 2015). Em alguns problemas devem ser tomadas decisões do tipo "sim ou não", assim, com apenas duas alternativas, as decisões podem ser representadas por meio de variáveis que podem assumir apenas dois valores: 1, que indica "sim"; e 0 que indica "não" (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Problemas de programação inteira que contêm variáveis dessa natureza são denominadas como problemas de programação inteira binária (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

## 2.3. Alguns métodos heurísticos para o PCV assimétrico

Segundo Belfiore e Fávero (2013), o problema do caixeiro viajante (PCV) envolve a determinação de uma melhor rota com um menor custo, um conjunto de cidades, no qual o caixeiro sai da cidade de origem, passa por todas as outras cidades (nós) uma única vez e, posteriormente, retorna para ao ponto de origem, ou seja, a rota inicia e termina no mesmo nó. De acordo com Arenales *et al.* (2015) A distância entre as cidades  $i$  e  $j$  é representada por  $c_{ij}$ , e quando  $c_{ij}$  é igual a  $c_{ji}$ , o problema é considerado simétrico; caso contrário, é denominado assimétrico. Ainda segundo os mesmos autores para resolver o PCV assimétrico é necessário a seguinte formulação:

Parâmetros:

$c_{ij}$ : Distância entre o nó  $i$  e o nó  $j$ .

### Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o caixeiro vai diretamente do nó } i \text{ ao } j, i \neq j, i = 1, 2, \dots, n \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

### Função objetivo:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

### Restrições:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n, j \neq i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (4)$$

$$\mathbf{x} \in B^{n(n-1)} \quad (5)$$

Onde a função objetivo (1) indica a minimização das distâncias percorrida, a restrição (2) garante com que o caixeiro chegue a cada nó apenas uma vez, enquanto a restrição (3) garante com que ele saia de cada nó exatamente uma vez. A restrição (4) impede a formação de subrotas ao passo que a restrição (5) indica que as variáveis de decisão são binárias.

O PCV se tornou difícil de solucionar computacionalmente a partir da grande quantidade de cidades nos problemas (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Arenales *et al.* (2015) definem os métodos heurísticos como técnicas para ajudar a resolver problemas que eram considerados complexos e inviáveis de serem solucionados por métodos de otimização tradicionais, devido ao grande número de variáveis e restrições. Ainda segundo os autores, utilizar as heurísticas permite produzir várias soluções viáveis, abrangendo as opções para a tomada de decisão, porém não define qual seria a solução ótima. O quadro 1 apresenta as heurísticas utilizadas neste trabalho.

**Quadro 1 – Heurísticas utilizadas para solucionar o PCV assimétrico**

Heurística	Descrição
Heurística do vizinho mais próximo	De acordo com Taha (2008), a heurística conhecida como "vizinho mais próximo" tem início a partir de uma cidade inicial qualquer, visitando, em seguida, a cidade mais próxima. A partir da última cidade visitada, é escolhida a próxima cidade mais próxima que ainda não tenha sido visitada e esse processo se repete até que todas as cidades tenham sido visitadas (ARENALES <i>et al.</i> , 2015).
Heurística do subcircuito inverso	Segundo Taha (2008) em uma situação com n cidades, a abordagem do subcircuito inverso inicia com um circuito válido e busca aprimorá-lo ao reverter subcircuitos que contêm duas cidades; em seguida, avança para subcircuitos de três cidades e prossegue até alcançar subcircuitos com tamanho igual a n-1 cidades.

Fonte: Arenales *et al.* (2015) e Taha (2008)

### 3. Metodologia

Para realizar o presente trabalho foi desenvolvido um estudo de caso em uma empresa responsável pela coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Canindé-CE. Foi feita

uma entrevista com a responsável pelo setor de coleta de resíduos sólidos urbanos da empresa, na qual foi possível entender como funcionam as rotas pela cidade.

A pesquisa foi desenvolvida utilizando as etapas para realizar um estudo em pesquisa operacional proposta por Taha (2008), excetuando-se a fase de implementação da solução conforme representa na figura 1.

**Figura 1 - Fases de implementação da pesquisa operacional**



**Fonte: Autores (2023)**

Segundo Taha (2008), na primeira fase do estudo define-se o escopo do problema. Também são estabelecidos os objetivos que pretendem ser alcançados, quais abordagens auxiliarão para chegar na solução do modelo e delimitadas as restrições que serão aplicadas (BELFIORE; FÁVERO, 2013). No presente artigo a definição do problema foi realizada a partir de uma análise de dados disponibilizados pela responsável das coletas urbanas na empresa, contendo a quantidade de bairros atendidos, os dias da semana em que os caminhões passam em cada bairro e a quantidade de caminhões.

Durante a fase de construção do modelo, realiza-se a formulação de modelos matemáticos tendo como finalidade obter a otimização e proporcionar informações relevantes para facilitar a identificação das limitações, resultando em um conjunto de equações e inequações (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Para o artigo foi considerado o modelo do PCV assimétrico, sendo construído por meio de uma programação linear com variáveis binárias.

Na fase de solução do modelo utiliza-se técnicas e métodos para solucionar os modelos matemáticos identificados na etapa anterior (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Esta etapa é considerada um processo simples em que em sua maioria utiliza-se um software para resolver os modelos matemáticos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Para o artigo foi utilizado o software IBM CPLEX®, tendo como referência o trabalho feito por Teixeira (2023), que traz um modelo no referido software para resolver instâncias do PCV. Posteriormente, foram utilizadas as heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso para gerar rotas alternativas. A representação visual das rotas foi feita por meio de grafos utilizando o yEd live® e, ao final, comparou-se as rotas em termos de distância percorrida e custos.

Para a validação do modelo é necessário analisar se ele representa o fidedignamente o problema real estudado (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Com isso, foi realizado uma comparação dos resultados obtidos com a situação atual da empresa, identificando qual seria a melhor solução a ser aplicada na empresa. Nesta etapa, os resultados foram apresentados para a responsável pelas rotas de coletas de RSU em Canindé-CE.

## **4. Resultados e discussão**

### **4.1. Definição do problema**

Inicialmente foi posto em evidência o objetivo que a empresa deseja alcançar. Então, foi observado que a empresa tem como objetivo buscar as melhores rotas de coleta de RSU e, a partir disso, foi identificado o problema de trajetos e em sequência proposta uma melhoria nas rotas para minimizar as distâncias. Diante disso, foi feito um levantamento de dados da empresa, identificando a quantidade de bairros na cidade, totalizando 30 bairros, e a quantidade de veículos de coleta disponíveis na empresa para realizar a coleta nos bairros, totalizando cinco veículos, a tabela 1 abaixo exhibe as viagens de cada veículo.

**Tabela 1 – Viagens dos veículos**

Veículo	Quantidade de bairros	Dias da semana
Veículo 1	6	Segunda, quarta e sexta
	3	Terça, quinta e sábado
Veículo 2	3	Segunda, quarta e sexta
	3	Terça, quinta e sábado
Veículo 3	2	Segunda a sábado
Veículo 4	3	Segunda, quarta e sexta
	3	Terça, quinta e sábado
Veículo 5	4	Segunda, quarta e sexta
	4	Terça, quinta e sábado

Fonte: Autores (2023)

O terceiro veículo atende dois bairros de segunda a sábado, cuja rota foi escolhida como objeto de melhoria neste trabalho. A tabela 2 associa cada rua a um identificador e a tabela 3 apresenta a matriz de distâncias entre as ruas que estão atendidas pelo veículo 3 nestes dois bairros.

**Tabela 2 – Viagens dos veículos**

ID	Rua	ID	Rua
1	R. Monte Líbano	8	Trv. Raimundo Maurício
2	R. Padre Joaquim da Rocha	9	R. Célio Martins
3	R. Barro dos Santos	10	R. Dr. Geroncio Brígido Neto
4	Trv. Adelino Martins	11	R. Osvaldo Fonseca Coelho
5	R. José Alves	12	R. Chico Sales
6	R. São Roque	13	R. Paulino Barroso
7	R. Santo Afonso	14	R. General Sampaio

Fonte: Autores (2023)

**Tabela 3 – Distância em Km entre as ruas**

Ruas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	2,1	2,6	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,6	2,4	2,3	2,4	2,4	2,7
2	2,1	0	0,35	0,23	0,06	0,13	0,16	0,17	0,6	1	1	1,1	0,7	1,4
3	2,1	0,5	0	0,14	0,35	0,45	0,4	0,45	0,28	0,4	0,5	0,45	0,4	1,1
4	2,3	0,25	0,14	0	0,29	0,35	0,28	0,35	0,4	0,55	0,6	0,55	0,7	1,6
5	2,1	0,06	0,35	0,27	0	0,08	0,1	0,13	0,6	1,1	1,1	1,1	0,75	1,4
6	2,2	0,13	0,45	0,35	0,08	0	0,11	0,19	0,75	0,85	1	0,9	0,85	1,6
7	2,2	0,18	0,4	0,28	0,1	0,11	0	0,27	0,65	0,85	0,9	0,85	0,75	1,6
8	2,1	0,17	0,45	0,35	0,13	0,19	0,23	0	1	1,2	1,1	1,1	0,8	1,4
9	2,3	0,6	0,28	0,4	0,7	0,75	0,65	0,7	0	0,17	0,24	0,18	0,4	1,2
10	2,4	0,75	0,4	0,5	0,8	0,85	0,8	0,85	0,23	0	0,25	0,18	0,45	1,1
11	2,3	0,85	0,5	0,6	0,9	1	0,9	0,95	0,24	0,25	0	0,6	0,65	0,85
12	2,4	0,8	0,45	0,55	0,85	0,9	0,85	0,9	0,18	0,13	0,06	0	0,6	0,75
13	2,7	0,7	0,4	0,5	0,75	0,85	0,75	0,8	0,4	0,5	0,65	0,6	0	0,85
14	2,7	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1	0,65	0,75	1,1	0

Fonte: Autores (2023)

#### 4.2 Construção do modelo matemático

O modelo matemático foi construído considerando o modelo para o PCV assimétrico apresentado por Arenales *et al.* (2015). Neste caso, o “caixeiro” é representado pelo caminhão de coleta de RSU, totalizando 14 “cidades”, aqui representadas pelas paradas do caminhão, que deve sair da garagem, percorrer os 13 pontos de coleta do bairro Imaculada Conceição apenas uma vez e retornar à garagem. A seguir, o modelo matemático:

##### Parâmetros:

$c_{ij}$ : Distância entre a rua  $i$  e a rua  $j$ ,  $i \neq j$ ,  $i = 1, 2, \dots, 14$ .

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminhão for diretamente da rua } i \text{ à } j, i \neq j, i = 1, 2, \dots, 14 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Função objetivo:

$$\min z = \sum_{i=1}^{14} \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{14} c_{ij} x_{ij} \tag{6}$$

Restrições:

$$\sum_{i=1}^{14} x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, 14, j \neq i \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{14} x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, 14, i \neq j \tag{8}$$

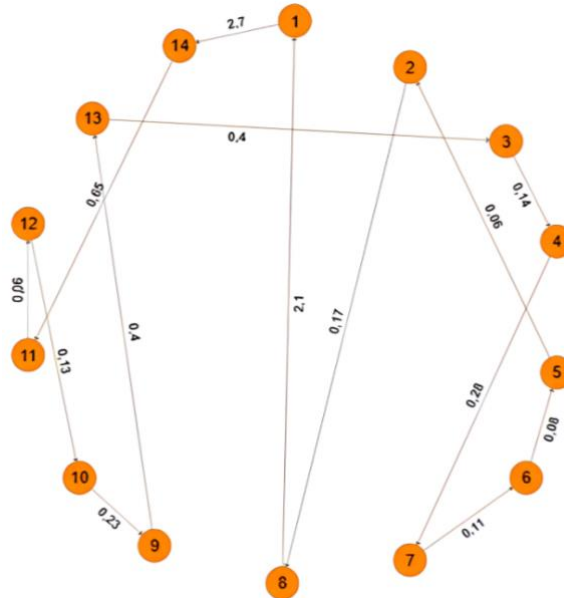
$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq 7 \tag{9}$$

$$\mathbf{x} \in B^{182} \tag{10}$$

**4.3. Solução e validação do modelo**

Utilizando o modelo proposto por Teixeira (2023), determinou-se a rota com menor distância, representada pela sequência de nós 1→14→11→12→10→9→13→3→4→7→6→5→2→8→1 com um total de 7,51 Km percorridos, conforme mostra a figura 1, na qual os resultados obtidos do software CPLEX® foram graficamente representados através do software yED Live®.

**Figura 2 - Grafo da solução ótima**



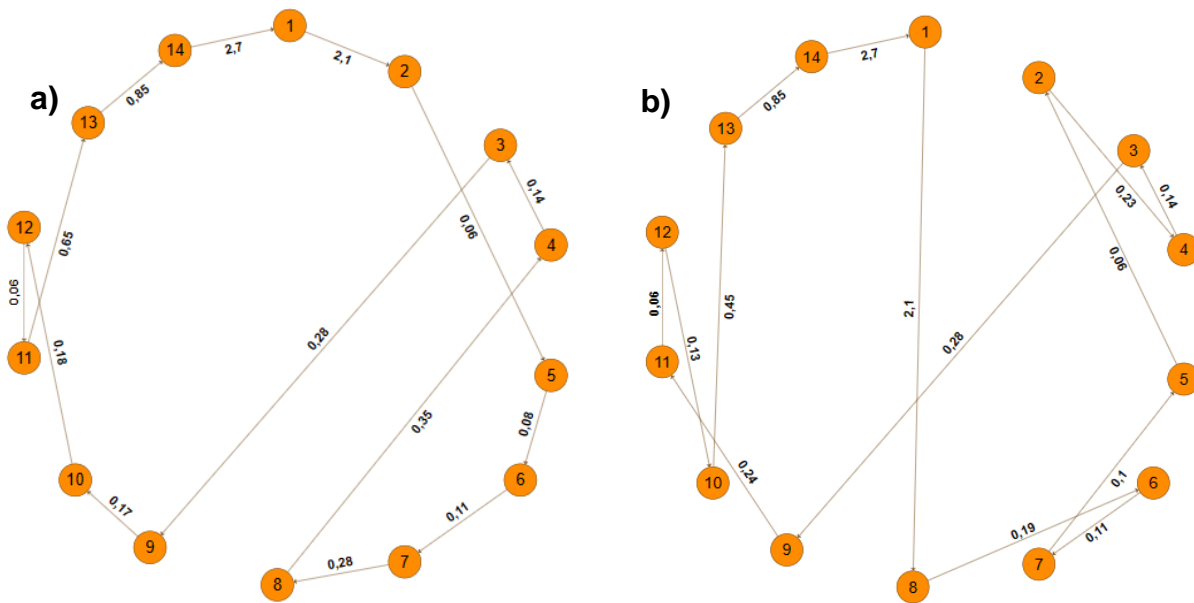
Fonte: Autores (2023)

Para o desenvolvimento das soluções heurísticas foi realizado primeiramente a heurística do vizinho mais próximo iniciando no nó 1, na qual foi encontrada a rota 1→2→5→6→7→8→4→3 →9→10→12→11→13→14→1 com uma distância total de 8 Km.



Logo em seguida, foi desenvolvida a heurística do subcircuito inverso a partir do resultado encontrado na heurística do vizinho mais próximo. A aplicação do método do subcircuito inverso na pesquisa foi realizada de modo que fosse feita a troca de cinco em cinco nós encontrou-se a rota e sua respectiva distância final, a partir disso, nas trocas que foram feitas não foi encontrado nenhuma outra rota com distância menor, resultando na rota 1→8→6→7→5→2→4→3→9→11→12→10→13→14→1 com uma distância total de 7,64 Km. A seguir encontram-se as representações por meio de grafos das rotas utilizando a heurística do vizinho mais próximo (a) e do subcircuito inverso (b).

**Figura 3 - Soluções obtidas com as heurísticas do vizinho mais próximo (a) e do subcircuito inverso (b)**



Fonte: Autores (2023)

A rota atual realizada pelo caminhão é de 8,97 Km por dia. Na tabela 4 é feita a comparação entre a rota atual e as rotas ótima e heurísticas em termos de redução de quilometragem percorrida e de custos com combustível no horizonte de um ano. Para tanto, considerou-se o consumo médio de 3 Km/L do caminhão, o preço médio do diesel no estado do Ceará de R\$/L 6,41 em 24 de novembro de 2023 (ANP, 2023) e a realização da rota 313 vezes no ano, pois não ocorre apenas aos domingos.

**Tabela 4 – Comparação entre as rotas atual, ótima e heurísticas**

Rota	Distância (Km)	Redução (%)	Distância (Km/ano)	Consumo (L)	Custo (R\$)	Economia (R\$)
Atual	8,97	-	2.807,61	935,87	5998,93	-
Ótima	7,51	16,28	2.350,63	783,54	5022,51	976,41
Vizinho	8,00	10,81	2.504,00	834,67	5350,21	648,71
Subcircuito	7,64	14,83	2.391,32	797,11	5109,45	889,47

Fonte: Autores (2023)

A tabela 4 traz resultados expressivos, ao revelar que todas as rotas alternativas geradas proporcionam reduções na distância percorrida superiores da ordem de dois dígitos quando comparadas com a rota atualmente empregada pela empresa no bairro. Evidencia-se que a solução ótima resulta em uma distância menor, o que se traduz em economia significativa de combustível ao longo de um ano (R\$ 97,41) em comparação com a rota atual.

Esses resultados foram apresentados para a proprietária da empresa, que indicou a viabilidade de utilização dessas rotas propostas. É importante ressaltar que esta análise considerou apenas os custos com combustíveis, não sendo considerados, por exemplo, a redução potencial de custos com manutenção do veículo em função da redução da



distância total percorrida em um ano proporcionada por qualquer uma das três rotas geradas.

## 5. Conclusões

No presente artigo o problema do caixeiro viajante assimétrico foi utilizado para identificar sugestões de rotas alternativas de coletas de resíduos sólidos na cidade de Canindé-CE com o objetivo de apontar a melhor rota para a empresa, a fim de minimizar a distância percorrida pelo veículo de coleta no bairro analisado. Para isso, foram utilizadas as heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso. Para a determinação da solução ótima utilizou-se o software CPLEX® e para a representação gráfica das rotas o software yEd live®.

Após os resultados encontrados, observou-se que as rotas descobertas tiveram uma redução considerável das distâncias em relação à rota atual que a empresa realiza, com destaque para rota ótima que obteve redução de 16,28% da distância percorrida na rota atualmente empregada pela empresa responsável pela coleta.

Uma limitação do estudo diz respeito à análise ser restrita a apenas uma das nove rotas realizadas para a coleta dos RSU na cidade. Contudo, pelos resultados obtidos, acredita-se que se o estudo fosse feito para todos os bairros contemplados pela empresa a economia nos gastos seria significativamente maior. Outro fator que também é importante levar em consideração é a diminuição do tempo de veículos em funcionamento nas ruas o que diminuiria a emissão de gases poluentes e melhoraria o fluxo de veículos nas ruas. Como trabalhos futuros, indica-se a expansão da análise, considerando todas as rotas de coleta, bem como a quantificação das reduções de custos com manutenção dos veículos a diminuição da emissão de gases do efeito estufa.

## Referências

ABRELPE 2022. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, São Paulo - SP, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 30 set. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>>. Acesso em: 02 out. 2023.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. SINIR 2019. **Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos**, Brasil, 10 ago. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 30 set. 2023.

GANSTERER, M., HARTL, R. F. Collaborative vehicle routing: a survey. **European Journal of Operational Research**, 268(1), 1-12. 2018)

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MEDEIROS, E.; MEDEIROS, E.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A.; **Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia: programação linear: simulação**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2017

MORO, M. F. **O problema do carteiro chinês aplicado na otimização de rotas usadas na coleta de lixo reciclável: um estudo de caso**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. 2014.

SILVA, Diewelly Maria *et al.* **Aplicação de roteirização por meio da pesquisa operacional para redução de custos uma empresa em Penedo-AL**. Anais do XI SIMPROD, 2019

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008

TEIXEIRA, A. B. S. **Roteirização de veículos em uma distribuidora de medicamentos e equipamentos hospitalares**. 2023. 83 f. TCC (Graduação) Bacharelado em Engenharia de Produção Civil - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará / Campus Quixadá, Quixadá, 2023.

TOTH, P., VIGO, D. (Ed.). **Vehicle routing: problems, methods, and applications**. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2014.