



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina



ANDRÉ LEONARDO FRANSON LOPES

**OTIMIZAÇÃO NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DE
UM MODELO DE DESIGNAÇÃO**

LONDRINA

2019

ANDRÉ LEONARDO FRANSON LOPES

**OTIMIZAÇÃO NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DE
UM MODELO DE DESIGNAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Coordenação de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Tondato

LONDRINA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DE UM MODELO DE DESIGNAÇÃO POR ANDRÉ LEONARDO FRANSON LOPES

Esta Monografia foi apresentada às 15:00 horas do dia 25 de junho de 2019 como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores relacionados abaixo. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho: **APROVADO.**

Prof. Dr. José Ângelo Ferreira (UTFPR)
Banca Examidadora

Prof. Dra. Silvana Rodrigues Quintilhano Tondato (UTFPR)
Banca Examidadora

Prof. Dr. Rogério Tondato (UTFPR)
Presidente da Banca Examinadora
Orientador

RESUMO

LOPES, André Leonardo Franson. **Otimização na coleta de resíduos sólidos através de um modelo de designação**. 2019. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

A Pesquisa Operacional mostra ser uma importante ferramenta para as organizações que buscam otimizar os resultados. Buscar o melhor modelo matemático para problemas reais quase sempre difere uma empresa de sucesso. Dentre os destaques da Pesquisa Operacional, os problemas de transporte, sobretudo a designação de rotas, consistem em estabelecer as melhores rotas para diminuir os custos da operação, seja ela de entrega, coleta ou até os dois simultaneamente. Como mostrado por diversos autores, a determinação de uma rota para otimizar a coleta de resíduos tornou-se o principal objetivo para as empresas responsáveis pela coleta e destino dos resíduos. Sendo assim, neste trabalho, tem-se como objetivo principal a otimização de rotas de coleta de lixo realizadas por uma empresa em uma cidade do norte do Paraná, sobretudo, com a utilização de designação de rotas para melhor alocação dos caminhões de coleta. Como metodologia, utilizou-se a pesquisa de campo para a obtenção dos dados mais importantes da empresa estudada, como as distâncias entre os setores e capacidade dos caminhões, bem como a construção do modelo e transcrição dos dados para o modelo matemático construído. Como resultados, observou-se uma melhor distribuição da distância total percorrida durante a semana, bem como uma redução de aproximadamente 12% nos dias de maior demanda. Além disso, a distância total semanal foi reduzida em 5%, o que implica em redução de custos de manutenção, consumo de combustível e emissão de poluentes.

Palavras-chave: Pesquisa operacional. Roteirização. Coleta de resíduos.

ABSTRACT

LOPES, André Leonardo Franson. **Waste collection optimization using a designation model**. 2019. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Federal Technology University of Paraná. Londrina, 2019.

Operational Research proves to be an important tool for organizations to optimize results. Finding the best mathematical model for real problems always differs from a successful company. Among the highlights of the Operational Research, transportation problems, especially the designation of routes, consist of establishing the best routes to reduce the costs of the operation, be it delivery, collection or even the two simultaneously. As shown by several authors, the determination of a route to optimize the collection of waste became the main objective for the companies responsible for the collection and destination of waste. Thus, in this work, the main objective is the optimization of the garbage collection routes performed by a company in the north of Paraná, mainly using the designation of routes to better allocation of collection trucks. As a methodology, the field research has used to obtain the most important data of the studied company, such as the distances between the sectors and the capacity of the trucks, as well as the construction of the model and transcription of the data for the constructed mathematical model calculation. As results, a better distribution of the total distance traveled during the week has observed, as well as a reduction of approximately 12% in the days of greater demand. In addition, the total weekly distance reduced by 5%, which means reducing maintenance costs, fuel consumption and emission of pollutants.

Keywords: Operational research. Routing. Waste collection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da implementação da Pesquisa Operacional.....	11
Figura 2 - Comparação entre as distâncias totais percorridas, em Km, por dia da semana.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aspectos gerais de zoneamento e transporte para roteirização.	13
Tabela 2 - Estudos realizados utilizando a pesquisa operacional para a resolução de problemas de transporte e de designação.	17
Tabela 3 - Representação dos dias de coleta, turno e demanda, em toneladas, por dia, para cada setor.....	21
Tabela 4 - Distâncias totais percorridas para atender ao setor, em km, considerando somente a ida.....	23
Tabela 5 - Descrição dos índices utilizados no modelo.....	25
Tabela 6 - Definição otimizada dos dias da semana para coleta de cada setor.....	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS.....	8
1.1.1 Objetivo Geral.....	8
1.1.2 Objetivos Específicos.....	8
1.2 JUSTIFICATIVA.....	8
1.3 PERGUNTA DE PARTIDA.....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 PEQUISA OPERACIONAL	10
2.2 PROBLEMAS DE TRANSPORTE	12
2.2.1 Aplicações	13
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 OBSERVAÇÃO E COLETA DE DADOS.....	19
3.2 MODELO UTILIZADO.....	20
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1 OBTENÇÃO DO MODELO	24
4.2 RESOLUÇÃO	26
4.3 RESULTADOS.....	28
5 CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

Com o intenso avanço tecnológico, as organizações existentes no mercado buscam aprimorar e desenvolver novos métodos que contribuam tanto para o aumento de produção, quanto para redução de custos. Como uma das alternativas, a Pesquisa Operacional busca estabelecer modelos matemáticos que aperfeiçoem determinados processos, otimizando recursos e estabelecendo parâmetros ideais para as organizações, sendo atualmente considerada uma ferramenta que diferencia empresas competitivas das mais comuns.

A Pesquisa Operacional está presente em diversas áreas e auxilia diretamente na resolução de problemas do mundo real com a utilização de uma modelagem matemática específica. Determinação de mix de produtos, escalonamento da produção, roteamento e logística, planejamento financeiro, carteiras de investimento, análise de projetos e alocação de recursos são alguns exemplos. Entre os modelos citados, os problemas de transporte, sobretudo, na designação de rotas, estão entre os mais citados pelos autores na atualidade. Assim como mostrado por Arnold e Sörensen (2018), os problemas de transporte determinam uma sequência de roteiros a serem cumpridos por veículos de uma frota, com o objetivo de atender uma série de pontos geograficamente dispersos com o menor caminho possível.

Diversos autores realizaram estudos tendo como base a otimização de rotas para problemas de transporte. Moro (2014), por exemplo, realizou o estudo para otimização das rotas da coleta de lixo reciclável na cidade de Matelândia-PR. Utilizando o *software Lingo*, teve como resultado uma diminuição de 32,64% na quilometragem total rodada pelos caminhões de coleta. Do mesmo modo, Xue e Cao (2016) fizeram um estudo sobre a coleta de lixo em Cingapura, determinando as melhores rotas para coleta e otimizando todo o percurso.

Deste modo, este trabalho tem como principal objetivo a otimização de rotas de coleta de lixo realizadas por uma empresa em uma cidade do norte do Paraná, sobretudo, com a utilização de designação de rotas para melhor alocação dos caminhões de coleta.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar rotas de coleta de lixo orgânico em uma cidade do norte do Paraná a fim de que as distâncias totais percorridas pelos caminhões de coleta sejam reduzidas, trazendo assim maior eficiência no processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que se possa atingir o objetivo geral apresentado, foram necessários os seguintes objetivos específicos:

- Levantar a fundamentação teórica sobre modelos de otimização de rotas;
- coletar dados da empresa para verificar a situação atual do sistema;
- transcrever o problema em linguagem matemática;
- modelar e simular situações que melhoram o funcionamento do sistema;
- analisar e discutir os resultados obtidos com o trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Um dos principais problemas na coleta de resíduos sólidos é reduzir rotas, que muitas vezes percorrem distâncias desnecessárias, a fim de que se tenha maiores economias. Muitas restrições existem neste sistema de coleta, tais como: horários, frequência, capacidade de carga e descarga e rotas a serem cumpridas (CUNHA, 2002). Assim como descrito por Wright e Lanzenauer (1991), uma das maneiras racionais de se fazer melhorias em rotas é recorrendo aos estudos da pesquisa operacional, que auxilia no processo de modelagem matemática do problema, na simulação buscando uma rota alternativa e mais rentável e também no processo de decisão da empresa.

Empresas que utilizam transporte ou coleta de produtos como meio de oferecerem seus serviços, normalmente não fazem um estudo para obter rotas mais econômicas (RAVINDRAN, PHILLIPS e SOLBERG, 1986). As rotas são estabelecidas por intuição, com rapidez e facilidade, mostrando ser a alternativa mais viável em um

primeiro instante. Todavia, essas rotas podem ser melhoradas, gerando assim um menor custo operacional.

Com base nisto, a otimização da rota de uma empresa de coleta de resíduos sólidos em uma cidade do norte do Paraná foi realizada reduzindo suas distâncias totais percorridas. A atual situação da rota, a modelagem matemática e a simulação por meio do *software IBM ILOG CPLEX* auxiliaram na obtenção de uma nova rota que se tornou economicamente mais viável, respeitando a demanda que cada região da cidade exige e também a capacidade dos veículos que fazem a coleta.

1.3 PERGUNTA DE PARTIDA

De que forma a otimização matemática irá contribuir para a redução das distâncias percorridas pelos caminhões coletores e consequente melhoria do nível de serviço de coleta?

2 REFERENCIAL TEÓRICO

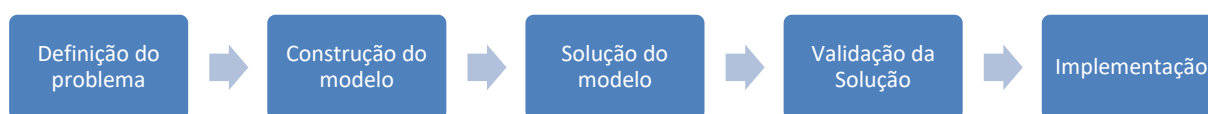
2.1 PEQUISA OPERACIONAL

A pesquisa operacional surgiu em meados de 1938 para analisar casos militares durante a Segunda Guerra Mundial. Por conta da Guerra, havia grande necessidade de racionar os recursos e distribuí-los da melhor forma possível (LEWIS, 2008). Com grandes resultados da pesquisa operacional em relação à guerra, foi natural sua expansão para aplicações em organizações civis.

Assim como mostrado por Ulbricht e Ribeiro (2012), a Pesquisa Operacional é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas. Com isso, é usada para avaliar linhas de ação alternativas e encontrar as soluções que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações (BLOEMHOF-RUWAARD *et al.*, 1995).

Como mostrado por Taha (2008), a implementação da pesquisa operacional leva em consideração 5 etapas principais (Figura 1). Primeiramente, se faz necessária a definição do problema, que limita o objetivo a ser investigado. Em seguida, é realizada a construção do modelo, que seria a tentativa de modelar a definição do problema em uma linguagem matemática. Nesta etapa, pode-se aplicar algoritmos já existentes, ou em casos mais complexos, utilizar uma heurística para solução. A terceira fase, e a mais simples, é a própria solução do modelo, que consiste na aplicação de algum algoritmo para encontrar a solução. Logo após a fase de solução do modelo vem a validação do próprio, que consiste em analisar se a solução encontrada anteriormente faz sentido em relação aos parâmetros predefinidos na fase de construção do modelo. Finalmente, tem-se a implementação da solução, onde se traduz os resultados obtidos em orientações para implementar o modelo no sistema operacional e realizar a tomada de decisão.

Figura 1 - Fluxograma da implementação da Pesquisa Operacional.



Fonte: Adaptado de Taha (2008).

Além das etapas descritas, Lachtermann (2009) complementa que a tomada de decisão pode ocorrer com a identificação de um problema, ocorrido quando o estado atual de algum produto ou processo é diferente do desejado, ou com uma oportunidade, ocorrida quando existe a chance de alteração ou melhora de um objetivo, dando à Pesquisa Operacional um grande número de técnicas para a soluções de problemas.

Entre as principais técnicas utilizadas, os modelos determinísticos são compostos por um conjunto de restrições do problema que devem ser atendidas em uma função objetivo, geralmente de maximização ou minimização (ARENALES *et al.*, 2007). Segundo os autores, a resolução destes problemas pode ser feita utilizando os seguintes métodos:

- Programação linear: a função objetivo e as restrições do modelo são formadas por funções lineares e as variáveis de decisão são contínuas;
- Programação não linear: análoga à linear. Todavia, uma equação não linear pode existir em seu conjunto de restrições (variáveis de ordem superior);
- Programação em redes: estruturadas por redes que consistem em nós, os quais são conectados a um ou mais caminhos;
- Programação binária e inteira: sendo a binária caracterizada por variáveis discretas e binárias, do tipo 0 ou 1; e a inteira caracterizadas por variáveis discretas;
- Programação por metas: problemas que apresentam mais de uma função objetivo;
- Programação dinâmica determinística: quando o problema inicial pode ser decomposto em subproblemas.

Para Moreira (2010), a base da pesquisa operacional é tratar problemas em processos de organizações através da metodologia científica e pode ser aplicada em várias áreas tais como indústrias, transporte, telecomunicações, finanças, saúde, serviços públicos, operações militares, entre outros. Dentre os que mais se destacam, os problemas de transporte são utilizados para minimizar os custos de expedição e, ao mesmo tempo, satisfazer o fornecimento e a demanda de materiais (LOEBLIN *et al.*, 2012).

2.2 PROBLEMAS DE TRANSPORTE

Dentre os problemas mais importantes em que o campo da pesquisa operacional consegue solucionar, o problema de transporte é definido de acordo com a necessidade que mercadorias têm de serem transportadas de m origens para n destinos (LAPORT, 2007). Assim como mostrado por Arnold e Sörensen (2018), os problemas de transporte consistem basicamente na determinação de uma sequência de um ou mais roteiros a serem cumpridos por veículos de uma frota, com o objetivo de atender uma série de pontos geograficamente dispersos, em locais previamente conhecidos.

Neste contexto, uma das principais classes nos problemas de transporte é a roteirização de veículos. Para Cunha (2000), a roteirização de veículos é caracterizada como um problema que tem por objetivo minimizar o custo total da operação, no qual a rota inicia e termina em uma sede, todos os pontos do roteiro têm que ser visitados uma vez e respeitando a capacidade do veículo que irá cumprir a rota. Com isso, cada ponto do roteiro apresenta sua demanda, sendo que a capacidade do veículo tende a ser menor ou igual a tal demanda (CATTARUZZA, ABSI e FEILLET, 2016).

Além dos aspectos de capacidade e demanda, noções básicas de zoneamento e transporte devem ser levadas em consideração na realização da modelagem para roteirização de veículos (ENOMOTO e LIMA, 2007). Segundo Valente *et al.* (2003) e Galvão (2003) as características básicas da coleta de carga no transporte rodoviário englobam aspectos das regiões geográficas, veículos e tempo necessário, sendo estes dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Aspectos gerais de zoneamento e transporte para roteirização.

Aspecto	Características
Região Geográfica	<ul style="list-style-type: none"> • Dividida em zonas; • cada zona apresenta contornos rígidos; • alterações momentâneas de contorno para acomodação de diferenças de demanda.
Veículos	<ul style="list-style-type: none"> • Alocação de um veículo por zona; • Despachados de uma origem ou depósito; • Localização do depósito de acordo com as zonas definidas
Tempo	<ul style="list-style-type: none"> • Deverá ser realizado dentro de um tempo de ciclo predeterminado. No caso de coleta / entrega urbana, o roteiro típico inicia-se pela manhã e se encerra no fim do dia (ou antes, se o roteiro for totalmente cumprido)

Fonte: Adaptado de Enemoto e Lima (2007).

Além disso, fatores como a restrição máxima para a jornada dos tripulantes e o desequilíbrio em termos de produção entre os veículos que atendem zonas próximas ao depósito e os que atendem zonas mais afastadas também devem ser levadas em consideração (NOVAES, 1989). Ainda segundo o autor, a determinação precisa dos contornos das zonas de distribuição constitui um problema complexo, já que envolve todos os conceitos citados acima. Na prática, os serviços logísticos de distribuição física de produtos têm as zonas dimensionadas e delimitadas por meio de procedimentos empíricos, baseadas na experiência contínua, sendo a pesquisa operacional de fundamental importância para a otimização de tais dados.

2.2.1 Aplicações

Com a crescente demanda por otimização de rotas, minimização dos custos e redução de emissões de poluentes, problemas de roteirização se tornaram alvo de diversas pesquisas relacionadas na área.

Shih e Lin (1999) realizaram um estudo sobre a coleta de resíduos hospitalares em Taiwan na cidade de Taipei. Os autores classificaram o problema como sendo um PVRP (*periodic vehicle routing problem* – problema de roteamento periódico de veículos), ou seja, os hospitais tinham que ser visitados para coleta em determinados

dias da semana. Foi proposto um método de duas fases para solução do problema, primeiro consideraram o problema como VRP (*vehicle routing problem* – problema de roteamento de veículos) sem restrição do intervalo de tempo em que os hospitais deveriam ser visitados para minimizar o total de viagens a ser feita, e posteriormente consideraram o problema como PVRP incluindo em quais dias determinados hospitais seriam visitados, equilibrando a carga de trabalho diária, propondo dois modelos de programação inteira mista, um em que a capacidade do caminhão era de 2 toneladas e outro no qual a capacidade era de 4 toneladas.

Para a primeira fase utilizaram-se da linguagem de programação FORTRAN para auxiliar os cálculos das heurísticas escolhidas, e para a segunda fase o *software* CPLEX foi requerido para solução do problema. Com os resultados obtidos verificou-se que para diminuir a quilometragem rodada pelos caminhões de coleta, a melhor opção seria caminhões com capacidades de 4 toneladas.

Xue e Cao (2016), fizeram um estudo sobre a coleta de lixo em Cingapura, onde o sistema de coleta funciona com caminhões fazendo suas rotas e levando os resíduos para um dos quatro centros de incineração do lixo, para diminuir seu volume, e posteriormente ser levado ao aterro. O estudo além de minimizar as rotas cumpridas pelos caminhões, também levou em consideração outros dois problemas que era a ocorrência de acidentes, pois os caminhões faziam rotas que passavam por ruas muito movimentadas, e a exposição da população ao tratamento do lixo. Os algoritmos utilizados no estudo foram uma adaptação da otimização de colônias de formigas (ACO) juntamente com o algoritmo de Dijkstra. Segundo a conclusão dos autores, o estudo serviu para auxiliar as autoridades locais na tomada de decisão, sugerindo mais de uma rota que pode ser escolhida pelas autoridades focando em diminuir a rota, diminuir a exposição da população ou diminuir a probabilidade de acidentes, ou ainda um ponto de equilíbrio entre os três.

Santos, Andrade e Tondato (2017), realizaram um estudo de caso sobre o gerenciamento de resíduos recicláveis na cidade de Londrina-PR. A coleta desses resíduos eram feitas por 7 cooperativas que atendiam a demanda de 84 áreas da cidade, não havia critério de escolha para determinada cooperativa atender determinada área, por conta disso os autores desenvolveram um modelo de programação linear inteira binária para resolver a situação como um problema de designação, ou seja, definir qual cooperativa atenderia tais áreas para diminuir a

distância total percorrida atendendo todas as áreas. Essas distâncias foram aproximadas reduzindo cada área a um ponto central da própria. Além disso foi levado em consideração a capacidade do caminhão, a capacidade dos barracões de cada cooperativa, e também uma estimativa de quantas residências cada cooperado conseguia atender para obter, além da diminuição das distâncias, um equilíbrio na carga de trabalho dos cooperados.

Os índices utilizados no modelo foram, i referente à área da cidade; j como barracão de uma cooperativa; k é o conjunto de barracões de uma cooperativa; d_{ij} é a distância (km) entre a área ' i ' e o barracão ' j '; c_j é a capacidade de processamento do barracão ' j '; r_{max} corresponde ao máximo de residências atendidas por cooperado; r_{min} é o mínimo de residências atendidas por cooperado; r_i é o número de residências da área ' i '; z_k é o número de cooperados da cooperativa ' k '; e x_{ij} é a variável binária para designar ou não a área ' i ' ao barracão ' j '.

E o modelo representou-se da seguinte forma:

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1.1)$$

Sujeito à:

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (1.2)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq c_j \quad \forall j \quad (1.3)$$

$$\sum_i \frac{r_i x_{ik}}{z_k} \geq r_{min} \quad \forall k \quad (1.4)$$

$$\sum_i \frac{r_i x_{ik}}{z_k} \leq r_{max} \quad \forall k \quad (1.5)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad (1.6)$$

Onde a função objetivo (equação 1.1) minimiza a distância total dos veículos de todas as cooperativas. A equação 1.2 garante a alocação da área ' i ' à apenas um barracão ' j '. A equação 1.3 garante que não exceda a capacidade de cada barracão ' c_j '. As equações 1.4 e 1.5 limitaram a capacidade de processamento de cada cooperado (r_{min} e r_{max}). E por fim a equação 1.6 determina que a variável x_{ij} é binária.

As simulações foram feitas através do *software* LINGO® 13, obtendo resultados significativos na diminuição das distâncias totais percorridas. Foi proposto duas simulações, simulação 1 levando em consideração o equilíbrio da carga de trabalho dos cooperados e simulação 2 sem essa restrição. A simulação 2 se apresentou um pouco melhor do que a simulação 1 em termos de distância percorrida, e as duas simulações obtiveram um resultado em torno de 40% a menos de distância percorrida se comparado com a situação inicial do problema.

Stringher (2004), em sua dissertação de mestrado, aplicou um Modelo de Programação Linear Inteira para a designação de rotas em um sistema de distribuição de eletrodomésticos de linha branca do país, para redução dos custos de transporte. Nesse estudo o autor parametrizou a geração de caminhos e os custos associados, primeiramente para testar alguns casos de criação própria e posteriormente para aplicar à situação real da distribuição. Foi utilizado o *software* VBA e também o CPLEX 7.0 para implementação do problema. O sistema de distribuição real contava com 4 origens e 185 destinos, porém para aplicação do modelo foi considerado apenas 3 origens e 55 destinos na região Sul e Sudeste por ser uma região com maior fluxo de rotas, o que facilitou a designação e conjugação das mesmas.

Neste trabalho, a função objetivo (equação 1.11) minimiza o custo total do transporte na rede de distribuição. Sujeito ao atendimento da demanda de viagens nos arcos (equação 1.12) e a equação 1.13 assegura que a quantidade de viagens no caminho p tem que ser um número inteiro e positivo. Onde i é o local de origem; j o local de destino; P representa o caminho formados de arcos ij e ji ; X_p é a quantidade de viagens no caminho P ; K_p apresenta-se binário e define se o arco pertence ao caminho P (equação 1.14); C_p é o custo de uma viagem no caminho P ; e DM_{ij} é a demanda de viagens do arco ij .

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_P C_p X_p \quad (1.11)$$

Sujeito à:

$$\sum_P K_p X_p = DM_{ij} \quad \forall ij \quad (1.12)$$

$$X_p \in \mathbb{N} \quad (1.13)$$

$$K_p = [0,1] \quad \forall ij \quad (1.14)$$

Após a aplicação do modelo verificou-se uma redução de mais de 4% no custo do transporte, o que gerou uma economia de mais de 1 milhão de reais por ano.

Além dos estudos apresentados, a Tabela 2 apresenta um resumo contendo mais exemplos de aplicações na pesquisa operacional.

Tabela 2 - Estudos realizados utilizando a pesquisa operacional para a resolução de problemas de transporte e de designação.

Autores	Objetivo	Metodologia	Resultados
Moro (2014)	Otimizar rotas da coleta de lixo reciclável na cidade de Matelândia-PR.	Problema do carteiro chinês e algoritmo de Fleury, resolvidos com auxílio dos <i>softwares</i> LINGO® e Scilab 5.2.2.	Diminuição 32,64% na quilometragem total rodada pelos caminhões de coleta.
Mendes, de Paula e Faria (2008)	Reduzir a rota de coleta de resíduos dos serviços de saúde na cidade de Uberlândia-MG.	Problema de roteamento de veículos periódicos (PVRP), resolvido com auxílio do <i>software</i> TransCAD.	Redução de 23% no tempo gasto com a coleta dos resíduos.
Junior e Filho (2010)	Analisar os gastos excedentes com combustível na coleta de resíduos na área central da cidade de Irati-PR.	O estudo baseou-se em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), e utilizou o <i>software</i> Spring versão 5.1.3.	Verificou-se um gasto anual com o excedente nos percursos improdutivos de R\$ 1.410,50.
Gomes et al. (2014)	Otimizar a eficiência de armazenagem de grãos de café para exportação, em uma empresa da região do Alto Paranaíba-MG.	Problema de designação com auxílio do <i>software</i> CPLEX versão 12.1.	Reduziu-se os custos decorrentes da movimentação dos grãos, facilitou a localização e a disponibilidade de cada grão, além de diminuir os riscos de acidentes que poderiam acontecer por ter áreas de armazenagem superlotadas.

Autores	Objetivo	Metodologia	Resultados
Steiner et al. (2000)	Otimização de uma rota de transporte escolar na cidade de Curitiba-PR.	Programação Linear Inteira e algumas heurísticas como o de Gillett e Johnson, e Clarke e Wright, além de procedimentos 2- <i>opt</i> e 3- <i>opt</i> implementados em linguagem Visual Basic 4.0.	Redução de aproximadamente 25% na distância total percorrida na rota realizada pela escola.
Simonetto e Borenstein (2006)	Minimizar a distância percorrida pelos veículos de coleta seletiva da cidade de Porto Alegre-RS.	Problema de roteamento de veículos (VRP), desenvolvida com auxílio do <i>software</i> ARENA.	Diminuição média de 43,8 quilômetros por dia rodados com um percentual de 8,82% em relação a atual situação analisada.

Fonte: Autor (2019).

As aplicações citadas mostram a importância da pesquisa operacional na resolução de problemas de transporte, bem como de designação. Com a ajuda dessa ferramenta, as organizações apresentam soluções mais otimizadas, tornando-se mais competitivas no Mercado atual.

3 METODOLOGIA

A natureza da pesquisa realizada foi considerada de caráter quantitativa, ou seja, os resultados analisados puderam ser quantificados. Como as amostras geralmente são grandes e consideradas representativas da população, os resultados são tomados como se constituíssem um retrato real de toda a população alvo da pesquisa.

Assim como apresentando por Gerhardt e Silveira (2009), o objetivo dessa pesquisa foi exploratório, já que, segundo os autores, uma pesquisa exploratória objetiva proporcionar familiaridade com o problema, com vistas a construir hipóteses ou torná-lo mais explícito. Essas pesquisas envolvem levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado, e análise de exemplos que estimulem a compreensão.

Já como método, a pesquisa levou em consideração a simulação de um modelo matemático construído de acordo com os dados levantados. De acordo com Noronha e Ferreria (2016), a modelagem matemática constitui um ramo próprio da matemática que traduz situações reais para uma linguagem matemática específica, para que por meio dela se possa compreender, prever, simular e mudar determinadas acontecimentos, determinando assim, estratégias de ação.

Deste modo, para que os objetivos citados fossem atingidos, a metodologia foi separada em três passos principais, sendo estes descritos nos tópicos a seguir.

3.1 OBSERVAÇÃO E COLETA DE DADOS

A observação e coleta de dados foram baseadas no método de pesquisa-ação, pois baseando-se em Gerhardt e Silveira (2009), pesquisa-ação é um tipo de investigação baseada no empirismo, formalizada com uma ação ou resolução de um problema em que pesquisadores e participantes do problema trabalham de forma participativa e cooperada.

Com base nisso, foi realizada uma pesquisa sobre os dados da roteirização de uma empresa responsável pela coleta de lixo em uma cidade do norte do estado do Paraná. O levantamento dos dados ocorreu por meio de entrevista, sendo que o

responsável pela empresa disponibilizou uma planilha contendo aspectos como a divisão da cidade por setores, capacidade dos caminhões e a origem e destinos dos mesmos para o mês de março de 2019.

3.2 MODELO UTILIZADO

A modelagem matemática constitui um ramo que tenta traduzir situações vividas diariamente para uma linguagem matemática, possibilitando a compreensão, previsão, simulação e mudança de determinadas vias de acontecimentos, tendo como base estratégias de ação, nas mais variadas áreas de conhecimento (NORONHA e FERREIRA, 2016).

Com isso, o modelo utilizado teve como base o trabalho de Santos, Andrade e Tondato (2017). Em seu estudo, os autores relatam que o problema da coleta de resíduos resume-se em transportar os resíduos produzidos em diferentes áreas de uma cidade até seu destino, que são locais onde os próprios receberão tratamentos de forma adequada. Em razão de os resíduos serem gerados ininterruptamente com o passar dos dias, necessita-se que a coleta seja feita frequentemente. Tal problema pode ser analisado de várias formas distintas, como por exemplo, pode-se estudar o número e capacidade ideais de caminhões para a coleta em determinado município para redução dos custos de transporte, ou pode-se definir quais as melhores rotas a serem percorridas pelos caminhões atendendo a demanda da cidade, sendo este utilizado como o objetivo da modelagem realizada.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

O modelo matemático construído foi analisado com a ajuda do *software IBM ILOG CPLEX*, analisando um total de 3600 variáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os dados analisados, a cidade em questão estudada conta com uma empresa responsável pela coleta de resíduos sólidos, que tem em sua frota 19 caminhões com capacidade de coleta de 13,5 toneladas. A cidade é dividida em 58 setores de coleta e mais um roteiro específico diferenciado no qual a empresa recolhe diariamente os resíduos gerados pelas empresas de coleta de lixos recicláveis. Desses 58 setores, 4 recebem visita dos caminhões coletores diariamente no período noturno, 27 são coletados de segunda, quarta e sexta nos períodos matutino ou noturno e os outros 27 são coletados de terça, quinta e sábado também nos períodos matutino ou noturno conforme pode ser observado na Tabela 3. A mesma também apresenta a quantidade de toneladas média recolhida durante a semana em cada setor.

Tabela 3 - Representação dos dias de coleta, turno e demanda, em toneladas, por dia, para cada setor.

Dias de coleta	Turno	Setor	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
DIÁRIO	NOITE	1	19,73	9,73	14,24	14,01	13,44	9,82
DIÁRIO	NOITE	2	17,37	8,62	12,42	10,94	12,04	8,85
DIÁRIO	NOITE	3	18,17	8,46	12,44	10,68	11,20	8,20
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	4	0,00	18,20	0,00	11,35	0,00	12,57
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	5	0,00	16,19	0,00	10,16	0,00	11,90
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	6	0,00	16,34	0,00	10,86	0,00	11,48
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	7	0,00	16,37	0,00	9,97	0,00	10,57
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	8	0,00	18,49	0,00	11,19	0,00	12,38
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	9	0,00	20,08	0,00	12,29	0,00	11,66
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	10	0,00	19,21	0,00	11,29	0,00	13,09
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	11	0,00	14,13	0,00	10,05	0,00	10,72
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	12	0,00	14,62	0,00	10,27	0,00	7,83
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	13	0,00	16,73	0,00	10,75	0,00	12,27
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	14	0,00	17,09	0,00	13,04	0,00	11,94
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	15	0,00	16,87	0,00	11,04	0,00	10,77
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	16	15,78	0,00	8,62	0,00	11,22	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	17	14,17	0,00	10,71	0,00	11,51	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	18	17,66	0,00	11,34	0,00	13,28	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	19	16,83	0,00	9,61	0,00	12,46	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	20	16,12	0,00	10,33	0,00	12,22	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	21	12,33	0,00	8,87	0,00	11,41	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	22	12,94	0,00	8,53	0,00	10,10	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	23	11,29	0,00	9,50	0,00	11,29	0,00

Dias de coleta	Turno	Setor	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
SEG/QUA/SEX	NOITE	24	14,06	0,00	9,81	0,00	12,09	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	25	13,29	0,00	9,72	0,00	10,60	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	26	13,44	0,00	9,79	0,00	11,54	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	27	14,93	0,00	10,30	0,00	11,66	0,00
SEG/QUA/SEX	NOITE	28	12,63	0,00	8,89	0,00	10,49	0,00
TER/QUI/SÁB	NOITE	29	0,00	13,73	0,00	12,91	0,00	10,68
TER/QUI/SÁB	NOITE	32	0,00	12,53	0,00	9,57	0,00	6,79
TER/QUI/SÁB	NOITE	33	0,00	11,90	0,00	9,87	0,00	9,25
SEG/QUA/SEX	NOITE	34	15,36	0,00	10,76	0,00	11,59	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	35	18,28	0,00	13,08	0,00	13,70	0,00
TER/QUI/SÁB	NOITE	36	0,00	10,28	0,00	9,30	0,00	9,21
TER/QUI/SÁB	NOITE	37	0,00	13,44	0,00	10,51	0,00	10,64
TER/QUI/SÁB	NOITE	39	0,00	8,68	0,00	9,65	0,00	7,76
TER/QUI/SÁB	NOITE	40	0,00	11,78	0,00	9,34	0,00	9,75
TER/QUI/SÁB	NOITE	41	0,00	13,68	0,00	12,01	0,00	11,22
TER/QUI/SÁB	NOITE	42	0,00	13,80	0,00	10,61	0,00	10,59
TER/QUI/SÁB	NOITE	43	0,00	11,90	0,00	10,63	0,00	10,15
TER/QUI/SÁB	NOITE	44	0,00	10,62	0,00	10,07	0,00	9,92
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	45	20,02	0,00	10,99	0,00	13,26	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	46	20,08	0,00	11,55	0,00	12,97	0,00
TER/QUI/SÁB	NOITE	48	0,00	14,56	0,00	10,93	0,00	9,05
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	49	18,30	0,00	11,28	0,00	12,39	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	50	19,10	0,00	12,82	0,00	14,30	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	51	17,52	0,00	13,21	0,00	15,08	0,00
DIÁRIO	NOITE	52	20,75	10,64	19,48	9,54	19,98	6,59
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	53	0,00	21,09	0,00	15,63	0,00	14,01
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	54	0,00	13,81	0,00	10,60	0,00	12,34
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	55	16,79	0,00	12,20	0,00	14,56	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	56	20,76	0,00	12,71	0,00	13,62	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	57	18,31	0,00	11,00	0,00	12,90	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	58	17,25	0,00	11,16	0,00	12,68	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	59	18,31	0,00	13,10	0,00	14,34	0,00
SEG/QUA/SEX	MANHÃ	60	10,04	0,00	5,76	0,00	7,85	0,00
TER/QUI/SÁB	MANHÃ	61	0,00	11,35	0,00	5,58	0,00	7,63
SEG/QUA/SEX	NOITE	APOIO	12,97	0,00	9,20	0,00	9,31	0,00
DIÁRIO	NOITE	ONG	6,66	6,59	10,01	9,31	5,13	10,19

Fonte: Autor (2019).

O roteiro das coletas consiste na saída dos caminhões da garagem direto para um setor de coleta, passando por todas as ruas do setor fazendo a coleta. Após feita a coleta, o caminhão retorna à garagem onde deixa os coletores e segue sua rota para o descarregamento no aterro municipal, no qual os coletores não podem entrar por questões de insalubridade. Cada equipe de coleta visita apenas um setor.

Como a rota dos caminhões têm que passar obrigatoriamente em todo o setor e após voltar para a garagem têm que seguir para o aterro, o estudo aqui apresentado analisou somente as distâncias da garagem aos setores e também entre os setores para diminuir a quilometragem rodada pelos caminhões.

Para o cálculo das distâncias totais percorridas entre um setor e a garagem da empresa, foi definido um ponto no centro de cada setor, e a distância considerada é a distância da garagem até este ponto. Tais distâncias foram obtidas através de um *software* de sistema de informação geográfica, o *Google Earth Pro*, e são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Distâncias totais percorridas para atender ao setor, em km, considerando somente a ida.

Setor	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
1	9,6	4,8	9,6	9,6	4,8	4,8
2	9,2	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
3	9,8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
4	0,0	19,6	0,0	9,8	0,0	9,8
5	0,0	17,4	0,0	8,7	0,0	8,7
6	0,0	14,8	0,0	7,4	0,0	7,4
7	0,0	14,2	0,0	7,1	0,0	7,1
8	0,0	14,2	0,0	7,1	0,0	7,1
9	0,0	12,2	0,0	6,1	0,0	6,1
10	0,0	11,4	0,0	5,7	0,0	5,7
11	0,0	14,4	0,0	7,2	0,0	7,2
12	0,0	13,6	0,0	6,8	0,0	6,8
13	0,0	13,8	0,0	6,9	0,0	6,9
14	0,0	12,2	0,0	6,1	0,0	6,1
15	0,0	17,8	0,0	8,9	0,0	8,9
16	9,8	0,0	4,9	0,0	4,9	0,0
17	5,6	0,0	2,8	0,0	2,8	0,0
18	6,6	0,0	3,3	0,0	3,3	0,0
19	5,6	0,0	2,8	0,0	2,8	0,0
20	11,0	0,0	5,5	0,0	5,5	0,0
21	6,5	0,0	6,5	0,0	6,5	0,0
22	6,6	0,0	6,6	0,0	6,6	0,0
23	5,2	0,0	5,2	0,0	5,2	0,0
24	7,6	0,0	3,8	0,0	3,8	0,0
25	2,9	0,0	2,9	0,0	2,9	0,0
26	2,7	0,0	2,7	0,0	2,7	0,0
27	3,6	0,0	1,8	0,0	1,8	0,0
28	0,7	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0
29	0,0	4,0	0,0	2,0	0,0	2,0
32	0,0	6,9	0,0	6,9	0,0	6,9

Setor	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
33	0,0	6,5	0,0	6,5	0,0	6,5
34	14,6	0,0	7,3	0,0	7,3	0,0
35	17,0	0,0	8,5	0,0	17,0	0,0
36	0,0	5,5	0,0	5,5	0,0	5,5
37	0,0	7,3	0,0	7,3	0,0	7,3
39	0,0	6,0	0,0	6,0	0,0	6,0
40	0,0	5,3	0,0	5,3	0,0	5,3
41	0,0	11,0	0,0	5,5	0,0	5,5
42	0,0	9,8	0,0	4,9	0,0	4,9
43	0,0	3,7	0,0	3,7	0,0	3,7
44	0,0	4,2	0,0	4,2	0,0	4,2
45	9,4	0,0	4,7	0,0	4,7	0,0
46	11,2	0,0	5,6	0,0	5,6	0,0
48	0,0	16,8	0,0	8,4	0,0	8,4
49	17,2	0,0	8,6	0,0	8,6	0,0
50	16,0	0,0	8,0	0,0	16,0	0,0
51	18,2	0,0	9,1	0,0	18,2	0,0
52	19,2	9,6	19,2	9,6	19,2	9,6
53	0,0	27,0	0,0	27,0	0,0	27,0
54	0,0	21,4	0,0	10,7	0,0	10,7
55	21,8	0,0	10,9	0,0	21,8	0,0
56	21,8	0,0	10,9	0,0	21,8	0,0
57	22,2	0,0	11,1	0,0	11,1	0,0
58	27,0	0,0	13,5	0,0	13,5	0,0
59	18,8	0,0	9,4	0,0	18,8	0,0
60	18,8	0,0	18,8	0,0	18,8	0,0
61	0,0	17,7	0,0	17,7	0,0	17,7
APOIO	9,1	0,0	9,1	0,0	9,1	0,0
ONG	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6

Fonte: Autor (2019).

Desta forma, a distância total aproximada percorrida semanalmente pela empresa é 3502,7 quilômetros.

4.1 OBTENÇÃO DO MODELO

Com base nos dados obtidos, a construção do modelo pôde ser realizada. A Tabela 4 apresenta os índices utilizados para a parametrização do modelo matemático.

Tabela 5 - Descrição dos índices utilizados no modelo.

Índice	Descrição
i	Setor de início;
j	Setor de fim;
k	Dia da semana;
d_{ij}	Distância (km) entre o setor 'i' e o setor 'j';
c_k	Capacidade diária de coleta;
d_k	Demanda total diária;
$U(i)$ e $U(j)$	Variáveis artificiais para que o modelo não crie uma sequência em <i>looping</i> ;
x_{ijk}	Variável binária relacionada a designar ou não a coleta dos setores 'i' ao 'j' no dia da semana 'k';

Fonte: Autor (2019).

Com os índices definidos, possibilita-se a construção do modelo matemático para a resolução do problema real. Assim as equações que modelam o problema são apresentadas abaixo.

$$\text{Min} \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ijk} \quad (1.15)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (1.16)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (1.17)$$

$$U(i) - U(j) + n x_{ij} \leq n - 1 \quad (1.18)$$

$$\sum_j x_{ij} d_j \leq C_k \quad (1.19)$$

$$\sum_j x_{ij} d_j \geq d_k \quad (1.20)$$

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \quad (1.21)$$

A equação 1.15 representa a função objetivo, utilizada para minimizar a distância total percorrida pelos caminhões coletores entre os setores da cidade. As restrições seguintes foram consideradas para o modelo real, onde as equações 1.16 e 1.17 representam o fluxo de entrada e saída de cada setor, determinando assim a

sequência dos pontos de coleta para cada dia da semana. A equação 1.18 assegura que a rota não retorne para um ponto no qual já tenha sido visitado. Já a equação 1.19 garante que a quantidade de resíduo coletado diariamente não seja ultrapassada pela capacidade dos caminhões coletores e, finalmente, a equação 1.20 assegura que toda a demanda diária seja atendida nos setores onde haverá coleta. Somado a isso, a equação 1.21 restringe o valor da variável x_{ijk} entre 0 e 1, mostrando que o problema é de classe binária.

4.2 RESOLUÇÃO

Inserido a função objetivo e as restrições descritas anteriormente no software *IBM ILOG CPLEX*, a designação das rotas pôde ser determinada. A Tabela 6 representa a determinação dos dias da semana para coleta de cada setor.

Tabela 6 - Definição otimizada dos dias da semana para coleta de cada setor.

Índice equiv.	Setor	seg	ter	qua	qui	sex	sab
1	Garagem						
2	1	1	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1
5	4	1	0	1	0	1	0
6	5	1	0	1	0	1	0
7	6	0	1	0	1	0	1
8	7	0	1	0	1	0	1
9	8	0	1	0	1	0	1
10	9	0	1	0	1	0	1
11	10	0	1	0	1	0	1
12	11	0	1	0	1	0	1
13	12	1	0	1	0	1	0
14	13	0	1	0	1	0	1
15	14	1	0	1	0	1	0
16	15	0	1	0	1	0	1
17	16	0	1	0	1	0	1
18	17	1	0	1	0	1	0
19	18	0	1	0	1	0	1
20	19	1	0	1	0	1	0
21	20	1	0	1	0	1	0
22	21	0	1	0	1	0	1
23	22	0	1	0	1	0	1
24	23	1	0	1	0	1	0
25	24	0	1	0	1	0	1

Índice equiv.	Setor	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
26	25	1	0	1	0	1	0
27	26	0	1	0	1	0	1
28	27	1	0	1	0	1	0
29	28	0	1	0	1	0	1
30	29	1	0	1	0	1	0
31	32	0	1	0	1	0	1
32	33	0	1	0	1	0	1
33	34	0	1	0	1	0	1
34	35	1	0	1	0	1	0
35	36	0	1	0	1	0	1
36	37	0	1	0	1	0	1
37	39	1	0	1	0	1	0
38	40	0	1	0	1	0	1
39	41	1	0	1	0	1	0
40	42	1	0	1	0	1	0
41	43	0	1	0	1	0	1
42	44	1	0	1	0	1	0
43	45	0	1	0	1	0	1
44	46	0	1	0	1	0	1
45	48	1	0	1	0	1	0
46	49	0	1	0	1	0	1
47	50	1	0	1	0	1	0
48	51	1	0	1	0	1	0
49	52	1	1	1	1	1	1
50	53	1	0	1	0	1	0
51	54	0	1	0	1	0	1
52	55	1	0	1	0	1	0
53	56	0	1	0	1	0	1
54	57	0	1	0	1	0	1
55	58	0	1	0	1	0	1
56	59	0	1	0	1	0	1
57	60	0	1	0	1	0	1
58	61	0	1	0	1	0	1
59	ONG	1	1	1	1	1	1
60	Apoio	0	1	0	1	0	1

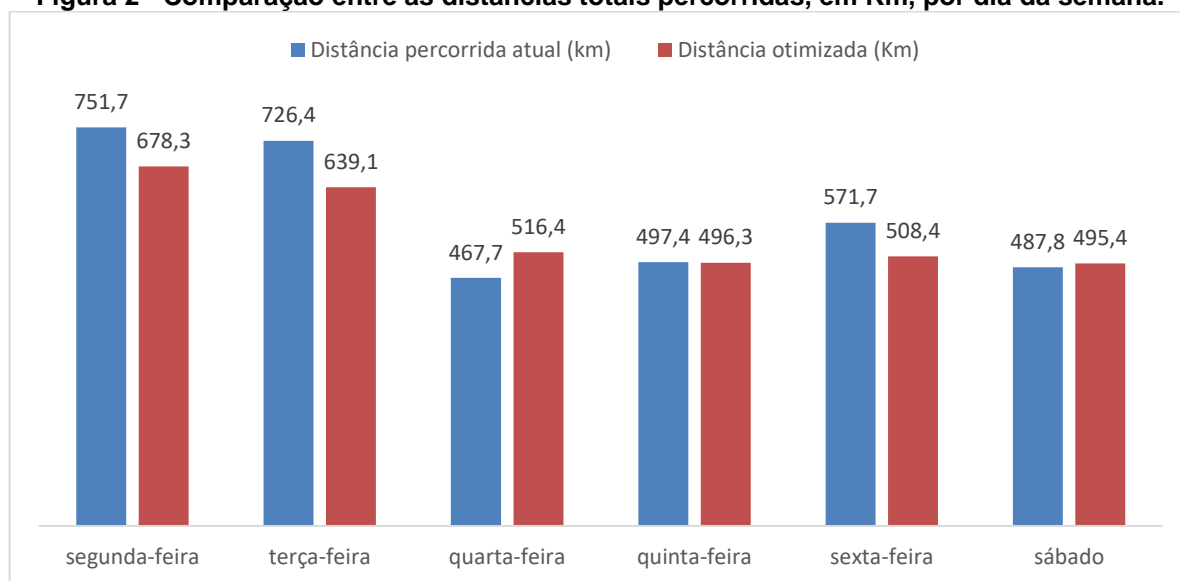
Fonte: Autor (2019).

Com base nos resultados mostrados, notou-se uma mudança nos dias de coleta em 28 setores. Além disso, como algumas rotas não exigem a capacidade máxima dos caminhões, os mesmos não apresentam a necessidade de retornar para a garagem, sendo então destinados a outros setores. Com isso, a distância total percorrida otimizada foi de 3.333,76 Km.

4.3 RESULTADOS

Com base nos dados levantados da empresa estudada e os dados obtidos com o modelo matemático, uma comparação pôde ser realizada. A Figura 2 apresenta uma comparação entre as distâncias totais diárias percorridas entre o atual cenário e o modelo otimizado.

Figura 2 - Comparação entre as distâncias totais percorridas, em Km, por dia da semana.



Fonte: Autor (2019).

Como mostrado na Figura 2, para as segundas, terças, quintas e sextas-feiras, a distância total percorrida apresentou uma redução média de 8%. Para as segundas e terças-feiras, a redução foi de aproximadamente 12%. Como relatado pela empresa, tais dias da semana são os que apresentam maior demanda de coleta, pois aos domingos o serviço de coleta não ocorre, gerando um acúmulo de resíduos.

Além disso, as distâncias totais ficaram melhor distribuídas no decorrer da semana. Somadas, a distância atualmente requerida ficou em 3.502,7 Km, frente aos 3.333,7 Km conseguidos com o modelo matemático. Isso demonstra uma redução de 5% na distância semanalmente. Considerando o consumo médio apresentado de 1,88 Km/L para cada caminhão, estima-se uma redução de 1863,2 para 1773,2 litros de combustível. Além de tais dados, pode-se destacar a redução de manutenção e emissão de poluentes, sendo este último item foco de diversas pesquisas na pesquisa operacional.

5 CONCLUSÃO

Os problemas de transporte são de grande importância para organizações que lidam com a coleta de resíduos. Com base nisso, uma empresa de coleta de resíduos situada no norte do Paraná foi analisada, tendo os dados de demanda, capacidade dos caminhões e distância entre os pontos coletados, sendo estes otimizados com a modelagem matemática proposta.

De acordo com os resultados apresentados, a utilização do modelo matemático proposto para otimização das rotas da empresa estudada mostrou uma redução de aproximadamente 5% na distância total percorrida semanalmente. Além disso, os dias que apresentaram maior sobrecarga de demanda tiveram uma redução de 12%, melhorando o serviço de coleta realizado. A redução na distância total impactou diretamente na redução de emissão de poluentes, consumo de combustível e manutenção da frota.

Além disso, a realização de uma fundamentação teórica, bem como levantamento dos principais modelos utilizados mostrou ser de fundamental importância na construção da função objetivo e das restrições aqui propostas. A realização da pesquisa em campo para obtenção e tratamento dos dados teve total contribuição na construção e resolução do modelo, sendo a aplicação dos conceitos teóricos aprendidos na prática propiciou uma melhora no conhecimento na área da pesquisa operacional

Como sugestão para trabalhos futuros, considera-se incluir o tempo de jornada de trabalho no modelo, além da verificação da influência na redução das rotas nos custos e emissão de poluentes.

REFERÊNCIAS

- ABOELMAGD, Y. M. R. Linear programming in construction sites. **Journal of Alexandria Engineering**, v. 57, p. 4177 – 4187, 2018.
- ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANESSE, H. Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ARNOLD, F.; SORENSEN, K. Knowledge-guided local search for the Vehicle Routing Problem. **Computers and Operations Research**, 2018.
- BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; BEEK, P.; HORDIJK, L.; WASSENHOVE, L. N. Interactions between operational research and environmental management. **European Journal of Operational Research**, v. 85, p. 229 – 243, 1995.
- CATARUZZA, D.; ABSI, N.; FEILLET, D. Vehicle routing problems with multiple trips. **4OR**, v. 14, p. 223–259, 2016.
- CUNHA, C. B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. Universidade Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- CUNHA, V.; FILHO, J. V. C. **Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos**: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. **Gestão e Produção**, v. 9, p. 143 – 161, 2002.
- ENOMOTO, L. M.; LIMA, R. S. Análise da distribuição física e roteirização em um atacadista. **Produção**, v. 17, p. 94 – 108, 2007.
- FERREIRA, R. P.; NORONHA, V. L. Modelagem matemática para simulação de interação entre presa *Ceratitis capitata* e predador *Diachasmimorpha longicaudata*. Disponível em: <<http://educacaopublica.cederj.edu.br/revista/artigos/modelagem-matematica-para-simulacao-de-interacao-entre-presa-ceratitis-capitata-e-predador-diachasmimorpha-longicaudata>> acessado em 07 de junho de 2019.
- GALVÃO, L. C. Dimensionamento de Sistemas de Distribuição através do Diagrama Multiplicativo de Voronoi com Pesos. 2003. 175 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC, Florianópolis, 2003.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Métodos de Pesquisa. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GOMES, H.; SILVA, L. M.; SOUSA, A. G.; PEIXOTO, M. G. M. **O Problema de Designação de Locais de Armazenagem**: Aplicação em uma Empresa do Setor de Agronegócio. **XXI Simpósio de Engenharia de Produção**, 2014.

JUNIOR, A. P.; FILHO, P. C. O. Análise de Rotas de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares com uso de Geoprocessamento. **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient, Curitiba**, v. 8, n. 2, p. 131-144, 2010.

LACHTERMACHER, G. Pesquisa operacional na tomada de decisões. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

LAPORTE, G. What you should know about the vehicle routing problem. **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 54, p. 811–819, 2007.

LEWIS, C. **Linear programming** Theory and applications, 2008.

LOEBLEIN, L. C.; GODOY, L. P.; TABORDA, L. W.; OLIVEIRA, D. C. Aplicação da programação linear para minimização de perdas de aparas em indústria metal mecânica. II Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2012.

MENDES, F. B.; PAULA, M. A. A. F.; FARIA, C. A. Estudo de Roteirização na Coleta de Resíduos Utilizando o Software Transcad. **4ª Semana do Servidor e 5ª Semana Acadêmica**, 2008.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional**: Curso Introdutório 2ª ed. Cengage Learning, 2010.

MORO, M. F. **O Problema do Carteiro Chinês Aplicado na Otimização de Rotas Usadas na Coleta de Lixo Reciclável**: Um Estudo de Caso. 2014. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

NOVAES, A. G. **Sistemas Logísticos**: Transporte, Armazenagem e Distribuição de Produtos. São Paulo: Edgard Bluncher, 1989.

RAVINDRAN, A.; PHILLIPS, D. T.; SOLBERG, J. J. **Operations research**: principles and practice. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.

SANTOS, B. S.; ANDRADE, P. R. L.; TONDATO, R. **Otimização na Coleta de Resíduos Recicláveis Através de um Modelo de Designação**: Um Estudo de Caso em Londrina-PR. **XXIV Simpósio de Engenharia de Produção**, 2017.

SHIH, Li-Hsing; LIN, Yung-Teh. Optimal Routing for Infectious Waste Collection. **Journal of Environmental Engineering**, v. 125, n. 5, p. 479 – 484, 1999.

SIMONETTO, E. O.; BORENSTEIN, D. **Gestão Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Urbanos**: Abordagem Utilizando um Sistema de Apoio à Decisão. **Gestão e Produção**, v. 13, n. 3, p. 449 – 461, 2006.

STEINER, M. T. A.; ZAMBONI, L. V. S.; COSTA, D. M. B.; CARNIERI, C.; SILVA, A, L. O Problema de Roteamento no Transporte Escolar. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 83 – 99, 2000.

STRINGHER, F. G. Designação de Rotas para Frota Dedicada em uma Rede de Distribuição de Linha Branca. 2004. 105 f. Dissertação de Mestrado, Curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

TAHA, H. A. Pesquisa Operacional 8ª ed. Pearson, 2008.

ULBRICHT, G.; RIBEIRO, R. **Otimização em formulação de rações utilizando técnicas de programação linear**: um estudo de caso em processos industriais. II Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2012.

VALENTE, A. M.; PASSAGLIA, E.; NOVAES, A. G. Gerenciamento de Transporte e Frota. São Paulo: Editora Pioneira, 2003.

WRIGHT, D. D.; LANZENAUER, C. H. Operational research and insurance. **European Journal of Operational Research**, v. 52, p. 129 – 141, 1991.

XUE, W.; CAO, K. Optimal Routing for Waste Collection: A Case Study in Singapore. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 30, no. 3, p. 554 - 572, 2016.

