

DETERMINAÇÃO DO PERCURSO MÍNIMO PARA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CIDADE DE SOUSA NO SERTÃO DO ESTADO DA PARAÍBA

Edna Maria de Oliveira Martins^a, Fernando Firmino da Silva^a,

Allan Sarmiento Vieira^{a*}, Ana Flávia Albuquerque Ventura^a,

Raul Ventura Júnior^a

^aUniversidade Federal de Campina Grande – UFCG (CCJS), Campina Grande – PB, Brasil

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é determinar uma rota ótima de coleta de resíduos sólidos e seus respectivos pontos de coletas, dos domicílios do centro da cidade de Sousa, localizada no Alto Sertão da Paraíba, utilizando técnicas de programação matemática e a ferramenta computacional Solver do Excel 2010. Foi utilizado também o sistema de informação geográfica, Google Earth, para roteirização e determinação das distâncias das ruas e do posicionamento dos pontos de coletas. Após a modelagem do sistema, os resultados demonstraram que ocorreu uma redução considerável nos custos de percurso, proporcionando uma coleta mais eficaz. Portanto, o uso das técnicas de otimização podem se mostrar como ótimas alternativas para o planejamento sustentável das cidades.

Palavras-Chaves: Otimização, Grafos, Resíduos.

Abstract

The main objective of this paper is to determine an optimal path solid waste collection points and their collections, of households in the city Center Sousa located in Alto Sertão da Paraíba state, using mathematical programming techniques and computational tool Solver in Excel 2010. It was also used the geographic information system, Google Earth, for the routing and determination of the distances of the streets and the placement of collection points. After system modeling results showed that there was a considerable reduction in the cost of travel, providing a more efficient collection. Therefore the use of optimization techniques has shown over the years an indispensable tool in planning sustainable cities.

Keywords: Optimization, Graphs, Waste.

*Autor para correspondência: e-mail: allan.sarmiento@ufcg.edu.br

1. Introdução

Os modelos de otimização são formulados para encontrar os valores de um conjunto de variáveis de decisão que aperfeiçoem (maximizam e/ou minimizam) uma função objetivo sujeita a restrições. A função objetivo e as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão. Porém não existe, um modelo de otimização geral que resolva de forma eficiente os diferentes tipos de problemas do dia a dia. O que estão disponíveis são técnicas de programação matemática capaz de se adequar ao sistema analisado (VIEIRA, 2011).

Essas técnicas de otimização tornam-se essenciais na determinação do planejamento ótimo de qualquer cidade ou instituições que visem minimizar os possíveis riscos. Assim, com a globalização, a concorrência é incentivada e fazem com que os tomadores de decisão busquem diferentes soluções a fim de minimizar os possíveis custos, que na maioria das vezes são altos e dependendo da problemática torna-se de complexa aplicação, recorrendo ao uso de alguns softwares, que geralmente são caros e de difícil operação.

Melo e Ferreira (2001) descrevem e comparam vários softwares utilizados na resolução dos problemas de logística, que na qual podem ser citados: os TRUCKSTOPS, o ROADSHOW e o TRANSCAD. No entanto, existem outros programas utilizados na solução de modelos matemáticos, que são menos onerosos e de fácil acesso, como o SOLVER do EXCEL da Microsoft e o MATLAB do Laboratório MATRIX do Novo México nos Estados Unidos, que podem ser ótimas saídas pra resolução de problemas de roteamento.

No trabalho de Detofeno e Steiner (2009), foi observado, que os municípios gastam entre 7% e 15% dos recursos do orçamento com serviços de coleta de resíduos, dos quais 50% são destinados exclusivamente à coleta e ao transporte de resíduos. Certamente, com utilização das técnicas de otimização (Árvore Geradora Mínima - AGM), poderia levar qualquer município a reduzir os seus custos de transporte e obter uma economia significativa dos recursos públicos.

Sousa e Urritia (2010) definiram a Árvore Geradora Mínima como um algoritmo clássico que utilizam técnicas combinadas de otimização capaz de encontrar o custo mínimo em um grafo conexo onde as arestas possuem custos para concatenar com os vértices e ideal para problemas de transporte.

Um dos problemas de logística que merece destaque é o da coleta de resíduos sólidos das cidades que apresentam inúmeras deficiências devido à falta de um planejamento adequado que minimizem os custos. Segundo Brollo e Silva (2001), esses problemas vêm

aumentando e são decorrentes de uma gestão ineficiente e do aumento da produção de resíduos sólidos nas cidades, ficando notório que a utilização de técnicas de otimização são necessárias no planejamento e gerenciamento racional que visam aliviar as despesas relativas ao transporte. Para Lima *et al.*, (2012) quando o problema é solucionado com eficiência e com planejamento, a coleta de resíduos sólidos fica organizada, minimizam as incidências de doenças e diminuem conseqüentemente os elevados custos operacionais envolvidos da administração pública.

Com base nos conceitos de roteirização, dispondo de aparato computacional e se utilizando de técnicas de otimização, o objetivo principal deste trabalho é determinar a árvore geradora mínima (percurso e pontos coletores) para o centro da cidade de Sousa, situada no Alto Sertão do Estado da Paraíba, a fim de desonerar o orçamento municipal e aumentar a qualidade de vida da região.

Este artigo está organizado em seções. Na seção 2, foram apresentados brevemente alguns conceitos básicos, técnicas de solução relacionadas aos problemas de logística e a descrição de ferramentas computacionais utilizadas nesta pesquisa. Na seção 3 foram mostrados os materiais (dados) e métodos da pesquisa (modelo de otimização). Seção 4 apresenta os resultados e discussões, já na seção 6 foi dedicada para as conclusões da pesquisa, seguida pelas referências bibliográficas.

2. Referencial Teórico

2.1. Grafos

Um grafo G consiste em um conjunto finito de variáveis que representam a idéia de relação entre objetos, este é formado por vértices ou nós (N) e arcos ou arestas (A), sendo G representado por $G = (A, N)$, onde $(i, j) \in A$, onde $i \in V$ e $j \in V$ (LOESH e HEIN, 2009). Estes grafos podem ser denominados de orientados (Figura 1), quando os sentidos de suas ligações são considerados ou não orientados, quando não possuem ordem ou orientação (Figura 2).

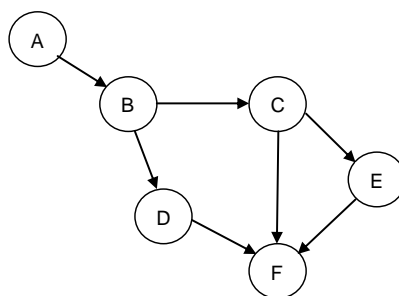


Figura 1. Grafo orientado. Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

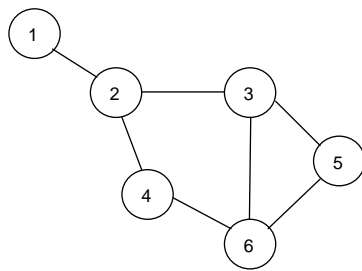


Figura 2. Grafo não-orientado. Fonte: Elaborado pelo autor, 2014.

Segundo Silva (2012) o problema típico de logística é encontrar a árvore de amplitude mínima de um determinado grafo e mostra através de vários algoritmos a sua importância no planejamento. Alguns algoritmos que podem ser utilizados na resolução deste problema são os algoritmos de Borůvka (1926), Kruskal (1956) e Prim (1957).

Para Santiago (2010) como os números de variáveis dependem da complexidade do sistema analisado, a utilização de um algoritmo exato torna-se, às vezes inviável devido ao seu elevado tempo de processamento e requerimentos de hardware sofisticados. Além disso, alguns algoritmos possuem algumas limitações, também possuem procedimentos matemáticos de difíceis entendimentos, que podem comprometer o processo de tomada de decisão.

É tendência na área de planejamento e gerenciamento dos sistemas a utilização de técnicas combinadas. Silva et al. (2013) desenvolveu e aplicou um modelo com técnicas combinadas no planejamento da produção de etanol e da energia em uma usina de cana de açúcar e depois fez a comparação com outros modelos.

Assim a árvore geradora mínima é também uma técnica combinada que pode ser utilizada em diversas áreas, como por exemplo, na minimização de custos de distribuição de água e esgoto, redes de telecomunicação, roteamento para empresas logísticas, implantação de dutos de gás natural, na prestação de serviços públicos como a coleta seletiva, entre outras aplicações (COLIN, 2007).

2.2. Algoritmos para obtenção da Árvore Mínima

Para Passos (2008), árvore geradora mínima é aquela que apresenta o menor comprimento e passa por todos os nós. Na literatura existem vários trabalhos desenvolvidos como o de Passos (2008), Urritia *et al.*, (2010) e Loesh (2009), estes trabalhos apresentam vários conceitos e algoritmos que permitem solucionar problemas desse tipo, podendo ser citados um dos mais utilizados:

- **Algoritmo Kruskal:** Essa modelagem matemática deve obedecer aos seguintes passos: O valor que chegar a origem deve ser o mesmo do destino; São consideradas as ligações que existirem nos dois sentidos; A árvore geradora mínima não deve apresentar polígonos fechados; Para obtenção da árvore deverão ser unidos os arcos de menor comprimento;
- **Algoritmo Prim:** Esse algoritmo também pode ser utilizado para determinação da árvore geradora mínima e se utiliza do princípio de escolher um vértice e procurar chegar aos vértices subseqüentes, ou seja, aquela que apresentam o menor comprimento ou tempo.

2.2.3. Modelagem com o Solver do Excel

Para Colin (2007) os problemas de modelagem que têm aplicação em um fato real, em determinadas situações, sofrem alterações onde os números de equações e de variáveis crescem rapidamente dependentemente da complexidade do problema, ficando muito difícil a solução manual. Existem inúmeros softwares que resolvem problemas que envolvem técnicas de programação linear, mas o importante é considerar dois aspectos: flexibilidade e aplicabilidade. Segundo Lourenço *et al.* (2014) o auxílio computacional é de suma importância quando trata-se de problemas grandes complexidades. Deste modo, o uso de software como o Solver possibilitou a compreensão e solucionar problemas de grande porte e bastante utilizados no meio empresarial.

O Solver é o suplemento que pertence ao conjunto de programas do Excel, que algumas vezes, é chamado de ferramentas de análise. Com o Solver você pode localizar o valor ótimo de uma determinada função objetivo localizada numa célula de destino na planilha eletrônica. Além disso, ele ajusta os valores das variáveis que for especifica até reproduzir o resultado desejado. Você ainda pode inserir restrições inerentes ao sistema a ser estudado e resolve um objetivo por vez. Bharatiand e Singh (2014) desenvolveram um modelo matemático com vários objetivos e com a mesma essência matemática utilizada no algoritmo do Solver.

2.3. Problema do Caixeiro Viajante - ACV

Considerado o primeiro problema de roteirização da história, o problema do caixeiro viajante se propõe a encontrar a melhor rota ou sequência de pontos possíveis de forma que minimize a distância percorrida e garanta que cada ponto seja visitado apenas uma vez.

O problema do caixeiro viajante é considerado de resolução difícil na determinação do roteamento de veículos, pertencendo segundo Goldberg (2005) *apud* Barão (2008) “à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “*NP-hard*”), o que significa que possuem ordem de complexidade não polinomial”. Portanto, o esforço computacional para a sua resolução cresce significativamente de acordo com a quantidade de variáveis do problema.

Por possuir esse gargalo, este tipo de problema aplicado a situações reais de classe *NP-hard* não possuem resolução ótima, portanto se utilizam de técnicas heurísticas, que propõem a melhor solução para um problema que, no entanto, não é a ótima.

A utilização da técnica heurística melhora a eficiência do processo de busca, que possivelmente podem sacrificar a solução ótima. Esta técnica é conhecida como um guia de turismo e permite apontar direções geralmente interessantes. Pode tornar-se imprópria, no sentido de que pode deixar de fora pontos de interesse para determinados indivíduos (LOESH e HEIN, 2009, p. 178). As técnicas heurísticas podem muitas vezes não oferecer uma solução ótima, no entanto, nos ajudam a obter a melhor solução para dado problema, como os problemas de roteirização de veículos.

2.4. Sistema de Informações Geográficas (SIG)

A utilização do Sistema de Informações Geográficas é uma ferramenta indispensável no processo de planejamento e gerenciamento das atividades de uma organização. Para Pizt *et al.* (2001) esses sistemas eram utilizados somente na geração de mapas, mas nos dias atuais são utilizados em diferentes áreas como: a agricultura, controle florestal, gestão de bacias, transporte, entre outros. Medeiros (2012) ressalta que o acesso da informação e o conhecimento dos sistemas de informações geográficas são ferramentas auxiliares e essenciais para um planejamento racional da sociedade e devem ser utilizados a fim de atender as necessidades de governo ou da população em tempo hábil e de forma segura.

3. Metodologia

Segundo Miguel *et al.* (2010) este trabalho pode ser enquadrado como uma pesquisa aplicada, buscando atingir objetivos descritivos, pois o modelo de otimização proposto representam as variáveis do sistema, de forma simplificada, que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão dos processos reais e obtendo conseqüentemente o diagnóstico. A forma de abordar o problema é quantitativa.

3.1. Área Estudada

A cidade de Sousa está localizada no interior do Estado da Paraíba. Pertencente à Mesorregião do Sertão Paraibano e à Microrregião de Sousa, distante 427 km da capital. É o terceiro maior município do Estado em extensão territorial. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010 a população estimada foi de 65.807 habitantes, sendo o sexto mais populoso. O município de Sousa encontra-se, segundo os dados do Google Earth, numa latitude de 6°46'3.20" Sul e longitude 38°13'40.21" Oeste. A área de estudo restringiu-se ao bairro do Centro, considerado pela Secretaria de Planejamento da cidade como a região crítica para coleta dos resíduos.

3.2. Caracterização da Coleta de Resíduos Sólidos da Cidade Estudada

A prefeitura da cidade de Sousa é responsável pela coleta dos resíduos sólidos e pela sua disposição final. A coleta é feita em horários aleatórios e três vezes por semana na maioria dos bairros. No centro da cidade a coleta é feita de forma periódica devido à intensa atividade do comércio. Possui 02 transportes coletores de 5 metros e não possui aterro sanitário, sendo o lixo jogado num local a céu aberto próximo a BR 230. Observou-se ainda que a cidade, principalmente no centro (Figura 3), não possui uma coleta planejada, como: instalação de pontos coletores, percurso mínimo de transporte, coleta seletiva, entre outros pontos a serem considerados.



Figura 3: Rota original de coleta do lixo no centro de Sousa-PB. Fonte: Google Earth, 2013.

3.3. Modelo Proposto

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica e descritiva que trata sobre a otimização da rota de veículos coletores de lixo no centro da cidade de Sousa. Além disso, foram pesquisadas e identificadas as ruas que fazem parte do referido bairro por meio da utilização do mapa da cidade. Em seguida foram delimitadas e marcadas, na qual foi mensurado o comprimento de cada rua utilizando aplicativo Google Earth.

Dessa forma, para solucionar o problema proposto, na busca da árvore geradora mínima que informará o menor percurso, com base neste contexto foi proposto o seguinte modelo matemático:

Função objetivo:

$$\text{Minimizar } C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_i * X_j \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \geq 1 \text{ (restrição de conectividade)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = b \text{ (propriedade da árvore)} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq d \text{ (quebra do ciclo)} \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \text{ (restrição binária)} \quad (5)$$

$$X_{ij} \geq 0 \text{ onde: } i = 1,2,\dots,n \text{ e } j = 1,2,\dots,m \text{ (restrição de não-negatividade)} \quad (6)$$

onde:

C - é o comprimento mínimo;

a_i - é comprimento de cada arco;

X_j - variáveis de escolha (se for igual 1 pertence a árvore mínima, caso contrário será 0 não pertence a árvore);

b - é número de arestas mínimas (número de nós menos 1);

d - número de arcos que deve ficar num ciclo.

Após desenvolver a modelagem matemática foi adaptado para o Excel 2010 e resolvido pelo suplemento de otimização SOLVER, onde na seção a seguir serão demonstrados os resultados obtidos.

4. Resultados

Através dos dados coletados e utilizando o modelo matemático proposto chegou-se ao seguinte resultado: o percurso mínimo feito pelo caminhão de coleta será de 6.898 metros, em contraposição ao percurso que está sendo praticado atualmente de 13.192 metros, isso representa em termos percentuais uma diminuição 47,7 % da rota percorrida. A Figura 4 mostra o mapa com nova rota a ser percorrida durante a coleta. Os pontos coletores serão localizados nas extremidades e nos pontos de intercessão das ruas.



Figura 4: Rota mínima de coleta do lixo no centro de Sousa-PB. Fonte: Google Earth, 2013.

Por não existir uma coleta seletiva na cidade de Sousa-PB, a mesma é feita sem a devida orientação dos cidadãos para separação do lixo, sendo totalmente misturado. A coleta é feita de forma ineficiente, pois o caminhão passa ao longo de todas as ruas para recolher o lixo, acarretando maiores custos aos cofres públicos e ocasionando demora no atendimento das demais ruas. Com a instalação dos pontos coletores e o desenvolvimento de uma política

de educação ambiental para a cidade, haverá uma conscientização e incentivo na seleção do lixo.

Além disso, a cidade não possui um aterro sanitário, que deve ser instalado imediatamente, já que o mesmo está diretamente ligado à saúde pública. O local ideal para instalação seria distante de qualquer manancial e próximo do perímetro urbano. Ainda, é proposta a criação de uma Associação para os Agentes Ambientais que estarão diretamente ligados ao aterro sanitário.

5. Conclusões

A proposta deste trabalho foi trazer algumas contribuições da variedade de aplicações da árvore geradora mínima que tem como objetivo principal a determinação do menor percurso. Portanto, com a modelagem matemática proposta e as ferramentas computacionais disponíveis foi determinada a rota mínima percorrida por um caminhão coletor de lixo e, além disso, a proposta de instalação de pontos de coleta seletiva nos pontos de intercessão e nas extremidades das ruas.

O resultado obtido comprovou a eficácia do modelo proposto e das ferramentas utilizadas na resolução de problemas logísticos, demonstrando uma diminuição de 47,7% na rota percorrida pelo caminhão no centro da cidade, representando conseqüentemente uma minimização nos custos do orçamento municipal.

Apesar de não abranger de forma mais profunda as questões de roteamento de veículos com a utilização da árvore geradora mínima e o problema do carteiro viajante, este trabalho serve como base para ampliação de novas pesquisas como: a sinalização das ruas, capacidade dos caminhões, horários de coleta (janela de tempo), entre outros.

Contudo a pesquisa operacional, especificamente as técnicas de otimização, são imprescindíveis para que o tomador de decisão promova um planejamento racional e sustentável para as cidades.

Referências

- Barão, F. R., Kripka, M. e Kripka, R. M. L., (2008). Determinação da rota ótima para a coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo – RS. In: Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada, 31. Belém: CNMAC, p. 63.
- Bharatiand, S. K., Singh, S. R., (2014). Solving Multi Objective Linear Programming Problems Using Intuitionistic Fuzzy Optimization Method: A Comparative Study. International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 4, No. 1.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- Brollo, M. J. Silva, M. M. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Política e Gestão de Resíduos Sólidos revisão e análise sobre a atual situação no Brasil. São Paulo: 2001.
- Colin, E. C., (2007). Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégica, finanças, logísticas, produção, marketing e vendas. Livro; Editora LTC; Rio de Janeiro; p. 498.
- Detofeno, T. C. e Steiner, M. T. A., (2009). Otimização das rotas de coleta de resíduos urbanos, utilizando técnicas de pesquisa operacional. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 32., Cuiabá. Anais... Cuiabá: CNMAC, p.706.
- Lima, Renato da Silva ; lima, Josiane Palma ; Silva, T.V.V. . Roteirização em arcos com um sistema de informações geográficas para transportes: aplicação em coleta de resíduos sólidos urbanos. Journal of Transport Literature, v. 6, p. 180-196, 2012.
- Loesh, C. e Hein, N., (2009). Pesquisa operacional: fundamentos e modelos. São Paulo: Saraiva.
- Lourenço, A. A., Gomes, G. H. G., Carvalho, P. A. M., Mafra, R. S. C., Bretas, T. L., Silva, A. L., (2014). Apresentação de Material Pedagógico-Computacional para o Ensino Do Método Simplex. Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento. Rio de Janeiro, v.6, n.1, p. 67-80.
- Medeiros, C. N., (2012). Planejamento e Gestão Territorial Usando um Sig em Ambiente Web. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife – PE.
- Melo, A. C. S., Ferreira Filho, Virgílio J. M., (2001). Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. Pesquisa Operacional, v. 21, n.2, p. 223-232, Rio de Janeiro.
- Miguel, A. C. M; Fleury, A.; Mello, C. H. P; Nakano, D. N; Turrioni, J. B; Ho, L. L; Morabito, R; Martins, R. A. & Pureza, V. (2010). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações, 2a. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- Passos, E. J. P. F., (2008). Programação Linear Como Instrumento da Pesquisa Operacional; Livro; Editora Atlas, São Paulo; p. 330.
- Pitz, J. C e Figueiredo, D., (2001). Sistemas de Informações Geográficas. Trabalho de Introdução à informática. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Santiago, T. I. A., (2010). Um Algoritmo Heurístico para o Problema da Árvore Geradora Mínima de Grau Restrito Baseado Na Meta-Heurística Grasp e no Algoritmo de Prim, Faculdade Lourenço Filho, Monografia, Fortaleza – CE.
- Silva, A. F., Marins, F. A. S., Montevechi, J. A. B., (2013). Multi-choice mixed integer goal programming optimization for real problems in a sugar and ethanol milling company. Journal Applied Mathematical Modelling, v. 37, p.6146–6162.
- Silva, H. A., (2012). Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, p. 105.
- Souza, R. F. B. e Urrutia, S., (2010). O problema da árvore geradora mínima probabilística homogênea: modelagens exatas e heurísticas. In: Anais Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 42, Bento Gonçalves – RS.
- Vieira, A. S., (2011). Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento integrado dos sistemas de recursos hídricos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Pag. 275, Campina Grande, 2011.