

PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS APLICADO NA OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DE COLETA CONVENCIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO

Valquiria Melo Souza Correia

Marisete Dantas de Aquino

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia Civil – Saneamento Ambiental

Antônio Clécio Fontelles Thomaz

Instituto de Tecnologia da Informação e Comunicação

Marcílio Luís Viana Correia

Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Departamento de Engenharias

RESUMO

A pesquisa tem o objetivo de minimizar as distâncias percorridas pelo veículo de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos pelos responsáveis de realizar a coleta de lixo, que devem percorrer todas as ruas (arcos) do bairro Centro, no município do Crato/CE. Para a realização desta pesquisa, foram consideradas as rotas dos caminhões de coleta convencional, que é realizado em dias e horários alternados da semana, pré-estabelecidos pela equipe de trabalho. O processo heurístico do estudo de caso será desenvolvido pelo Problema do Carteiro Chinês Não Orientado, que possui como característica fazer o emparelhamento de nós de um grafo não direcionado. O resultado foi bastante expressivo porque, geralmente, os municípios não possuem qualquer instrumento de controle de rotas para as coletas de lixo convencional, como é o caso do município em estudo, em se há uma sobreposição de percursos.

ABSTRACT

The research aims to minimize the distances traveled by the collection vehicle and the transportation of solid urban waste by those responsible for collecting garbage, which must cover all the streets (arches) of the Centro district, in the municipality of Crato / CE. For the accomplishment of this research, the routes of the conventional collection trucks were considered, that is realized in alternating days and times of the week, pre-established by the work team. The heuristic process of the case study will be developed by the Unmanaged Chinese Postman Problem, which has the characteristic of pairing nodes of an undirected graph. The result was quite expressive because, generally, the municipalities do not have any route control instrument for conventional garbage collection, as is the case of the municipality under study, if there is an overlap of routes.

1. INTRODUÇÃO

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

O caso da coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um serviço oferecido pela prefeitura de quase todas as cidades brasileiras. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2017), o total de RSU gerados no Brasil aumentou cerca de 1,3% entre os anos de 2014 e 2015. Isto é, passou de 78,6 milhões de toneladas para 79,9 milhões de toneladas, de modo que, no mesmo período, a

população cresceu 0,8% e o Produto Interno Bruto (PIB) retraiu 3,8%. De acordo com o documento esse aumento da natalidade e o consumo de materiais descartáveis são os dois principais fatores para o aumento no número de lixo produzido.

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

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

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

O sistema de coleta de RSU apresenta complexidade, importância e custo, sendo esta uma tarefa essencial da administração pública (BARROS, 2012). Contudo, na maioria das vezes, a preocupação da administração municipal está somente em afastar os RSU da fonte geradora, necessariamente, não se importando com uma destinação final sanitariamente adequada. Isso em virtude da ausência de dados e informações contundentes que especifiquem e caracterizem os resíduos sólidos municipais e possibilitem uma gestão eficiente deles.

A proposta deste trabalho é minimizar as distâncias percorridas pelo caminhão de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos quanto às distâncias percorridas pelos responsáveis pela limpeza de rua, que devem percorrer todas as ruas (arcos) do bairro Centro, no município do Crato/CE.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os problemas acerca da “otimização de redes” incluem aplicações tradicionais. Ou seja, trata-se de encontrar a maneira mais eficiente de relacionar diversas localidades, direta ou indiretamente, encontrando o caminho mais curto entre dois nós, e propondo o fluxo máximo em uma rede (os nós conectados por ramificações) de modo que satisfaça os requisitos de suprimentos e a demanda em diferentes locais, programando as atividades de um determinado projeto.

Alguns pesquisadores como Colin, Cipparrone e Shimizu (1999), disponível também em Cunha (2000) e em Paes (2004), revelam que quando se dispõe de uma “otimização de rotas” consideram-se os ganhos que se obtém com a redução do custo de transporte, além da

satisfação do usuário que irá desfrutar de uma categoria de serviço bem mais eficiente.

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

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

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

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

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

De acordo com Deluqui (1998), a otimização do processo de coleta de resíduos sólidos urbanos deve buscar a máxima satisfação da população com a prestação de serviços, através da adequada consideração dos aspectos de qualidade, custos, atendimento e proteção à saúde

pública. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça um controle operacional dos serviços prestados que permita a avaliação dos mesmos.

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

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

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

O primeiro trabalho relacionado ao estado da arte que trata da modelagem de problemas de roteirização e programação de veículos e tribulações foi retratado por Bodin et al. (1983), que ainda é referência no assunto. Tendo em vista que os problemas de roteirização podem ser do tipo roteirização pura ou de roteirização e programação. Para problemas de roteirização pura, as condicionantes temporais não são importantes para a definição dos roteiros e das sequências de coletas e entregas, mas os aspectos espaciais da localização dos pontos a serem atendidos, objetivando construir roteiros viáveis a um menor custo possível. Com relação aos problemas de roteirização e programação, estes acontecem em situações em que estão presentes restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo).

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

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

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

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

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

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

Alguns pesquisadores classificam, Quadro 1, a coleta de resíduos sólidos em:

Quadro 1: Caracterização das 7 pontes num Grafo por Euler

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

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

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

3. MATERIAIS/MÉTODOS

A coleta dos resíduos sólidos no município do Crato, terceira cidade mais desenvolvida do estado do Ceará em número de residentes e o 9º maior PIB do Estado (IBGE, 2010). Com uma população de 121.428 habitantes, dividida da seguinte forma: 100.937 na zona urbana e 20.525 na zona rural, distribuídos em uma área total de 1.176,467 km², com densidade demográfica de 94,05 hab./km².

Para a realização desta pesquisa, foram consideradas as rotas dos caminhões de coleta convencional no bairro Centro da cidade. Este trabalho é realizado em dias e horários alternados da semana, pré-estabelecidos pela equipe de trabalho e, para isso, a empresa se utiliza de dois caminhões compactadores homogêneos (cada um com capacidade entre 9 a 12 toneladas).

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

O estudo foi realizado quanto à coleta de RSU no bairro Centro do município do Crato, em que o caminhão de coleta passa por todos os pontos de coleta de resíduos que estão situados nas ruas, de modo que há mais de um ponto de coleta em uma determinada rua, conforme a Figura 1 mostra a disposição das ruas no mapa.



Fig. 1: Ruas dispostas no mapa

A Figura 1 demonstra o grafo após a animação do percurso que foi tomado para resolver o problema. Trata-se de um grafo não euleriano, de modo que será necessário realizar as devidas operações para determinar um percurso ótimo para o grafo.

4. RESULTADOS/DISCUSSÃO

Após o trajeto com o caminhão a solução da rota é composta por rotas ótimas, uma para cada viagem/dia. Cada rota realizada tem início na garagem, mas ela de fato se inicia na entrada do bairro (nó 1) e término na saída do bairro (nó 140) com destino ao lixão que se encontra a aproximadamente 6 km de distância do nó número 36.

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

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

Na Figura 2 pode-se observar as rotas geradas pelo caminhão no bairro Centro, através do grafo.

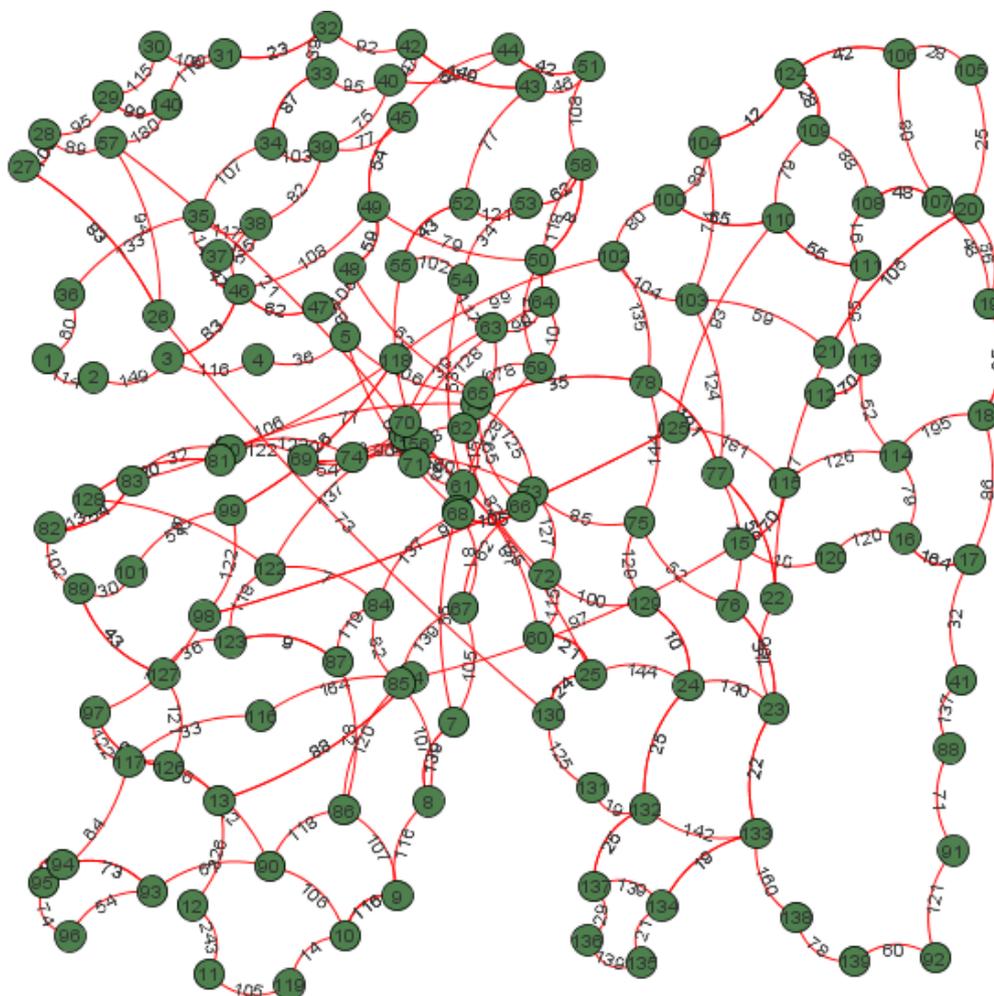


Fig. 2 Grafo Final do Estudo de Caso

O grafo possui todos os vértices e arestas coloridos, pois todos foram visitados durante o percurso do caminhão de coleta dos RSU. Todavia, ao executar o algoritmo, foram obtidos os resultados

mostrados no Quadro 1, abaixo.

Quadro 1 - Resultados

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

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

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

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

Tabela 1: Simulação do Consumo de Combustível da Rota Centro

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

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

Fonte: Elaborado pela autora.

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

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

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrelpe (2017) – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*, Disponível em http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2017/key_stats_2017.pdf. Acesso em: 27 dez 2017.
- ANP (2018) – Agência Nacional do Petróleo. *Sistema de Levantamento de Preços*, Disponível em http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Municipio_Posto.asp. Acesso em: 30 de maio 2018.
- Assad, A. A.; Golden, B. L. (1995) Arc routing methods and applications. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, v. 8, p. 375 – 483.
- Barros, R.T.V. (1999) Resíduos Sólidos. Belo Horizonte: *Apostila da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais*.
- Bodin, L. D.; Golden, B.; Assad, A.; Ball, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers and Operations Research*, v.10, n.2, p.63-211, 1983.
- Brasileiro, A. L.; Lacerda, G. M. (2002) Análise do uso de SIG no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidades de pequeno porte. In: *Simpósio Ítalo Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental*, 6, Vitória. Anais. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/cndsiet.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2009.
- Bräysy, O.; Dullaert, W.; Nakari, P. (2009) The potential of optimization in communal routing problems: case studies from Finland. *Journal of transport geography*. v. 17, n6, p.484-490.
- Colin, E. C.; Cipparrone, F. G.; Shimizu, T. (1999) Otimização do Custo de Transporte na Distribuição-Armazenagem de Açúcar. *Rev. Produção*, v. 9, n.1, p. 23-30, Rio de Janeiro.
- Cunha, C. B. (2000) Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. *Transportes*, v.8, n.2, p.51-74.
- Das, S.; Bhattacharyya, B. K. (2015) Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. *Waste Management*, n.43, p. 9-18.
- Dejax, P., Haouari, M. (1991). La résolution des problèmes complexes de tournées de véhicules. In: *Congrès International de Génie Industriel*, 3., 1991, Tours Actes, p. 897-906.
- Deluqui, K.K. (1998) *Roteirização para veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares utilizando um sistema de informação geográfica – SIG*. Dissertação de Mestrado Engenharia Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 218 p. São Carlos.
- Edmonds, J.; Johnson, E. L. (1973). *Matching, Euler Tours and the Chinese Postman Problem*, *Math. Program.* n.5, p. 88-124.
- Ghose, M. K.; Dikshit, A. K.; Sharma, S. K. A (2006). Gis based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. *Waste Management*, v.26, n11, p. 1287-1293.
- Goldbarg, M. C; Luna, H. P. L. (2000). *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. Rio de Janeiro, RJ: Campus.
- Goldberg, D.E.; Holland, J.H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, Springer, v. 3, n.2, p. 95-99.
- Golden, B.L.; Ball, M.; Bondin, L. (1981). Current and Future Research Directions in Network Optimization. *Computers & Operations research*, v. 8, n. 2, p. 71-81.
- Gredmaier, L.; Riley, K.; Vaz, F.; Heaven, S. (2013). Seasonal yield and fuel consumed for domestic, organic collections in currently operational door-to-door and bring-type collection systems. *Waste and Biomass Valorization*, v.4, n.3, p. 683-693.
- Hiramatsu, A.; Hara, Y.; Sekiyama, M.; Honda, R.; Chiemchaisri, C. (2009). Municipal solid waste flow and waste generation characteristics in an urban-rural fringe area in Thailand. *Waste Management & Research*. v.27, n.10, p. 951–960.
- Ibge (2016). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014/ 2016)*. Disponível

- em:<<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.
- Khan, D.; Samadder, S.R. (2016). Allocation of solid waste collection bins and route optimisation using geographical information system: A case study of Dhanbad City, India. *Waste Management & Research*, v.34, n.7, p.666-676.
- Kim, B.; Kim, S.; Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. v.33, n.12, p. 3624-3642.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operational Research*, v.59, n.3, p.345-358.
- Laporte, G. (1993). Recent Algorithmic Developments for the Travelling Salesman Problem and the Vehicle Routing Problem. *Montréal: Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal*. (Publication 932)
- Ore, O. (1990). *Graphs and their Uses* 2 ed.. Washington: The Mathematical Association of America.
- Paes, G. F. (2004). *Otimização de rotas para coleta do resíduo doméstico: um tratamento GRASP do problema do carteiro chinês misto (PCCM)*. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes.
- Pillac, V.; Guéret, C.; Medaglia, A. L.(2012). An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing. *Decision Support Systems*, n.54, p. 414-423.
- Qureshi, A. G.; Taniguchi, E.; Yamada, T. (2009). An exact solution approach for vehicle routing and scheduling problems with soft time windows. *Transportation Research Part E*, v.45, n.6, p. 960-977.
- Ramos, T. R. P.; Gomes, M. I.; Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, v.33, n.8, p. 1691-1703.
- Ribeiro, G. M.; Campos, V. B. G. (2001). *Um Procedimento para Roteirização e Programação de Veículos Usando a Heurística de Ganhos para o Planejamento*. In: SBPO, XXXIII, 2001, Campos do Jordão. Routing Systems Informática Ltda – Manual do RoadShow Módulos I e II.
- Sanjeevi, V.; Shahabudeen, P. (2016). Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. *Waste Management & Research*. v.34, n.1, p. 11-21.
- Teixeira, J.; Antunes, A. P.; Sousa, J. P. (2004). Recyclable waste collection planning - a case study. *European Journal of Operational Research*. v.158, n.3, p. 543-554.
- Wilson, C. D. H.; Williams, I. D. (2007). Kerbside collection: A case study from the north-west of England. *Resources, Conservation and Recycling*. v.2, n.2, p.381-394.
- Witucki, M.; Dejax, P.; Touati, N.(1994). Le problème des tournées de véhicules dans une entreprise de transport et distribution: um exemple de modelisation. In: *Congrès International de Génie Industriel*, 1994, Montréal. Actes, p.1885-1894.

Valquiria Melo Souza Correia (valquiria@ufersa.edu.br)

Marisete Dantas de Aquino (marisete@ufc.br)

Departamento de Engenharia Civil (Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará

Antônio Clécio Fontelles Thomaz (clecio@itic.org.br)

Marcílio Luís Viana Correia (marcilio.correia@ufersa.edu.br)