

Heurística para solução do problema da coleta de resíduos sólidos domiciliares (RSD) com base no problema do carteiro chinês capacitado com múltiplas viagens (PCCC-MV)

Janine Pereira Jacinto¹, Rodrigo de Alvarenga Rosa², Rafael Silva Banos³

Abstract: The fast growing world population, mainly in urban centers, increases the generation of domestic solid waste. Every day, tons of solid waste generated in households which are up to the government of each city to have strategies to collect, transport and dispose them. Considering that most of the heuristics and models proposed so far consider a trip per shift and ignores the idle time of the shift after returning the truck to the depot, the proposed heuristic of this paper generates for each truck multiple trips per shift in order to collect more solid waste without increasing the fleet. Thus, this paper proposes a heuristic for solving the problem of collecting solid waste based on the Capacitate Chinese Postman Problem with Multiple Trips (CCPP-MV) where each truck can make more than one trip in a time shift. To validate the proposed heuristic, we performed a practical application at the municipality of Cariacica, Espírito Santo, which has 176 neighborhoods.

Keywords: Urban solid waste collection. Arc Routing. City Logistics.

Resumo: O rápido crescimento da população mundial, concentrada, principalmente, nos grandes centros urbanos, acarreta a geração crescente de resíduos sólidos domiciliares (RSD). Todos os dias, toneladas desses resíduos são gerados nos domicílios e cabe à administração pública de cada cidade possuir mecanismos para que este resíduo seja coletado, transportado e finalmente destinado. Tendo em vista que a maior parte das heurísticas e modelos propostos até o momento considera uma viagem por turno de trabalho e ignoram o tempo ocioso após o retorno do caminhão ao depósito, a heurística proposta neste artigo propõe a geração de múltiplas rotas para os caminhões dentro de um turno, a fim de conseguir coletar mais resíduos sem aumentar a frota. Assim, este artigo propõe uma heurística para solução do problema da coleta de RSD com base no Problema do Carteiro Chinês Capacitado com Múltiplas Viagens (PCCC-MV) em que cada caminhão, dentro do seu turno de trabalho, pode realizar mais de uma viagem aproveitando ao máximo esse tempo de turno. Para validar a heurística proposta, foi realizada uma aplicação prática junto ao município de Cariacica, Espírito Santo, que possui 176 bairros.

Palavras-chave: Coleta de resíduos sólidos urbanos. Roteirização em Arcos. Logística Urbana.

1 INTRODUÇÃO

Muitas são as questões advindas do rápido crescimento da população mundial, concentrada, principalmente, nos grandes centros urbanos. Um dos grandes problemas enfrentados nas cidades é a geração crescente de resíduos sólidos domiciliares (RSD), que está diretamente ligada ao crescimento populacional. Surge daí a necessidade de que existam políticas públicas adequadas voltadas para a coleta, o transporte e a destinação destes.

O problema da coleta de RSD usualmente é resolvido pelas administrações públicas sem um método científico, recaindo na experiência profis-

sional dos seus servidores. Vale a pena pensar que o recolhimento dos RSD precisa não somente de que sejam criados roteiros que atendam a uma região como um todo, mas que este seja feito da melhor maneira possível, pois invariavelmente os orçamentos públicos são restritos. Pelo levantamento bibliográfico realizado, o problema de coleta de resíduo sólido é tratado em vários artigos analisados como um problema de roteirização em arcos, mais especificamente pelo Problema do Carteiro Chinês Capacitado (PCCC) ou em inglês *Capacitated Chinese Postman Problem* (CCPP). Essas abordagens buscam roteiros ótimos ou quase ótimos, porém, eles não analisam o fato que muitos destes roteiros subutilizam o tempo disponível dos veículos e da equipe de trabalhadores dentro de um turno de trabalho.

Com base nesta constatação, este artigo tem por objetivo propor uma heurística para criar os roteiros da coleta de resíduo sólido domiciliar e, também, reaproveitar o tempo disponível de cada veículo em um turno de trabalho de sua respecti-

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil – E-mail: janinejacinto@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil – E-mail: rodrigo.a.rosa@ufes.br

³ Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil – E-mail: rafaelsilvabanos@hotmail.com

Manuscrito recebido em 30/05/2013 e aprovado para publicação em 21/01/2014. Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 22, n. 1, 2014. ISSN: 2237-1346 (online).

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i1.705>

va equipe, gerando vários roteiros por turno trabalhado, ou seja, realizando múltiplas viagens, o que passou a ser denominado como Problema do Carteiro Chinês Capacitado Múltiplas Viagens (PCCC-MV). Visando avaliar a heurística proposta, ela foi aplicada ao problema de coleta de resíduo sólido domiciliar da Prefeitura Municipal de Cariacica no Espírito Santo.

O trabalho está estruturado como se segue: a Seção 1 apresenta a introdução do trabalho, a Seção 2 descreve brevemente o Problema do Carteiro Chinês Capacitado, a Seção 3 faz uma revisão da literatura dos principais trabalhos escritos sobre a coleta de resíduos sólidos, a Seção 4 descreve o problema de coleta de resíduo sólido da Prefeitura Municipal de Cariacica-ES, a Seção 5 detalha a heurística proposta, a Seção 6 apresenta os resultados e faz uma análise dos mesmos destacando os ganhos da heurística e a Seção 7 é a conclusão deste artigo. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas neste artigo.

2 PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS CAPACITADO

O Problema de Roteirização em Arcos Capacitados (PRAC) (*Capacitated Arc Routing Problem - CARP*) foi proposto originalmente por Golden e Wong (1981) e consiste em encontrar um conjunto de rotas de custo mínimo para uma frota de veículos que passam por cada depósito (ponto de início e fim de cada rota) de tal forma que cada arco com demanda maior que zero seja atendido exatamente uma vez por um veículo respeitando sua capacidade máxima. Bodin *et al.* (1983) apresentam três subclasses básicas dos CARP's, sendo que todos eles podem ser definidos em grafos orientados, não orientados e mistos: 1) O Problema do Carteiro Chinês (PCC) (*Chinese Postman Problem - CPP*); 2) O Problema do Carteiro Rural (PCR) (*Rural Postman Problem - RPP*) e 3) O Problema do Carteiro Chinês Capacitado (PCCC) (*Capacitated Chinese Postman Problem - CCPP*).

Cada um desses problemas pode ser classificado em: 1) Direcionados, 2) Não Direcionados e 3) Mistos. Os problemas Direcionados são aqueles onde os arcos possuem um sentido específico, como exemplo tem-se as ruas com um sentido único, nos Não Direcionados os arcos não possuem um sentido específico, exemplo são as ruas de mão e contramão, e nos Mistos podem

ocorrer as duas situações anteriores no mesmo problema, o que representa a realidade das ruas das cidades.

O PCCC misto, objeto de estudo deste artigo, foi proposto como um caso especial do PRAC por Golden e Wong em 1981, por considerarem que o PCCC reflete situações reais mais diretamente que o PRAC. Os autores formularam matematicamente este problema como definido a seguir.

Parâmetros:

C_{ij} : custo de percorrer o arco (i,j) ;

V : conjunto de nós (vértices), onde $V=(1,2, \dots, n)$;

S : conjunto de veículos, onde $S=\{1, 2, \dots, p\}$;

Q_{ij} : demanda no arco (i,j) ;

w : capacidade de cada veículo;

Variáveis:

x_{ij}^p : assume valor 1 se o arco (i, j) é percorrido pelo veículo/carteiro p e 0 caso contrário;

l_{ij}^p : assume valor 1 se o carteiro/veículo p atende o arco (i, j) e 0 caso contrário;

f_{ij}^p : fluxo variável, que pode assumir valores positivos se $x_{ij}^p = 1$.

$$PCCC = \min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{p \in S} C_{ij}^p x_{ij}^p \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^p - \sum_{j \in V} x_{ji}^p = 0 \quad \forall i \in V, p \in S \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^s (l_{ij}^p + l_{ji}^p) = \left\lfloor \frac{q_{ij}}{w} \right\rfloor \quad \forall (i,j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij}^p \geq l_{ij}^p \quad \forall (i,j) \in E, p \in S \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} l_{ij}^p q_{ij}^p \leq w \quad \forall p \in S \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ij}^p - \sum_{j \in V} f_{ji}^p = \sum_{j \in V} l_{ij}^p \quad \forall i \in E \setminus \{1\}, p \in S \quad (6)$$

$$f_{ij}^p \leq (n^2) x_{ij}^p \quad \forall (i,j) \in E, p \in S \quad (7)$$

$$f_{ij}^p \geq 0 \quad \forall p \in S \quad (8)$$

$$q_{ij} > 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (9)$$

$$f_{ij}^p, x_{ij}^p \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, p \in S \quad (10)$$

A função objetivo (1) visa minimizar o custo, que usualmente é representado pela distância total percorrida. A equação (2) garante a continuidade das rotas dos carteiros/veículos. A equação (3) assegura que o atendimento dos veículos é

considerado em apenas uma das suas passadas pelo arco. A restrição (4) obriga que o veículo percorra os arcos que lhe forem designados a atender. A restrição (5) garante que a capacidade de atendimento de cada veículo não seja ultrapassada. A equação (6) garante que o fluxo de atendimento é igual ao computado pela designação aos veículos. As restrições (7), (8) e (9) garantem que sub-rotas ilegais sejam eliminadas. A restrição (10) é uma restrição de integralidade.

Tendo em vista, que os modelos matemáticos exatos têm dificuldade de resolver problemas de larga escala e pouca flexibilidade para atender as particularidades de cada problema, faz-se necessário buscar métodos heurísticos que, mesmo não achando a solução ótima, acham uma solução a mais próxima possível da ótima. Nesse sentido, este artigo propõe uma heurística que resolve o problema de coleta de RSD num município de médio porte e que incorpora as particularidades do problema tratado.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Beltrami e Bodin (1974) realizaram os primeiros estudos correlacionando o Problema de Roteirização em Arcos com aplicações no serviço de coleta de RSD na área urbana de Nova York. Gottinger (1988) propôs um modelo de gerenciamento de resíduos sólidos como um problema de fluxo em rede, além de desenvolver um algoritmo especial. O modelo é aplicado no gerenciamento de RSD da área metropolitana de Munique, na Alemanha. Kulcar (1996) abordou um estudo de caso da gestão e coleta de resíduos em Bruxelas, Bélgica. Tung e Pinnoi (2000) desenvolveram uma heurística baseada em programação mista e aplicaram na cidade de Hanoi, Vietnã. Carvalho (2001) utilizou a rotina existente do *software* TransCAD para roteamento para coleta de RSD desenvolvendo uma solução integrada para projetar um sistema de limpeza urbana em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi feita uma aplicação prática e com o resultado obteve-se um projeto completo do sistema com especificações contendo dimensionamento dos setores, atribuição de turnos e frequências de coletas, alocação de frota e roteamento. Lacerda (2003) utilizou o TransCAD com o objetivo de minimizar a extensão total a ser percorrida pelos veículos coletores de RSD. O estudo de caso foi realizado na cidade de Ilha Solteira – SP. Santos e Rodrigues (2003)

apresentaram uma aplicação, desenvolvida em um SIG, através do *software* ArcView, para coleta de resíduos sólidos urbanos. Esta aplicação foi testada na rede urbana de Coimbra, em Portugal, sendo que, o objetivo era minimizar a distância total percorrida e o número de veículos envolvidos.

Maniezzo (2004) e Maniezzo e Roffilli (2008) apresentaram diferentes metaheurísticas em Problemas de Roteirização em Arcos Capacitados Direcionados (DCARP) aplicadas ao problema de coleta de RSD com o objetivo de projetar rotas para os veículos de coleta desses materiais sujeitas a uma série de limitações operacionais. Os autores utilizaram a estratégia de primeiro particionar a cidade em zonas e, em seguida, resolve-se o encaminhamento para cada zona. Amponsah e Salhi (2004) apresentaram uma heurística construtiva baseada no CARP, que leva em conta o aspecto ambiental, bem como o custo da proposta para resolver o problema de roteirização da coleta de lixo. Eles propuseram um modelo com dois objetivos: minimizar os custos e os efeitos ao meio ambiente. Paes e Arica (2005) apresentaram uma proposta computacional para o Problema do Carteiro Chinês Misto – (*Mixed Chinese Postman Problem* – MCPP) destinado a melhorar a rota de veículos em um determinado setor de coleta. O algoritmo híbrido proposto para melhorar as rotas foi baseado na metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). Ghiani *et al.* (2005) realizaram um estudo sobre a coleta de resíduos sólidos no município de Castrovillari, Itália, e propuseram uma heurística baseada no CARP com a estratégia de primeiro agrupar e depois roteirizar.

Brito (2006) analisou o transporte de resíduos sólidos comerciais urbanos utilizando o TransCAD, na cidade de Ilha Solteira – SP. Castro (2006) apresentou um estudo de caso do serviço de coleta de RSD na cidade de Ituiutaba – MG, utilizando o *software* TrackMaker para o tratamento e obtenção dos dados e o *software* TransCAD para roteirização da coleta de resíduos sólidos domiciliares. Simoneto e Borenstein (2006) descreveram um sistema de apoio à decisão aplicado ao planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos utilizando a combinação de simulação de eventos discretos e heurísticas para o problema da alocação e roteamento de veículos. Os autores utilizaram dados da coleta seletiva de um município do Rio Grande do Sul. Filho e Junqueira (2006) trataram CPP e propuse-

ram uma heurística para auxiliar na escolha de métodos adequados a fim de se resolver casos reais de coleta de lixo e coleta de correios em uma cidade do interior paulista. Li *et al.* (2006) analisaram a coleta de resíduos sólidos na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, visando minimizar o tempo total de funcionamento e os custos fixos do caminhão. Cordeiro (2008) propôs a utilização de heurísticas na criação de um método para a resolução dos Problemas de Roteirização em Arcos de uma empresa privada do setor de limpeza urbana. O método foi desenvolvido a partir da estratégia de agrupar primeiro e roteirizar depois, em um grafo não orientado. Bautista e Pereira (2004) Bautista *et al.* (2008) apresentaram uma heurística Colônia de Formigas aplicada ao recolhimento de lixo urbano aplicando-a na cidade de Barcelona, Espanha. Santos, Coutinho-Rodrigues e Current (2008) apresentaram um modelo *Spatial Decision Support System* (SDSS) para gerar rotas com uma frota heterogênea que pode incorrer no fato de algumas ruas serem demasiadamente estreitas para veículos de tamanho padrão atravessar. O método foi aplicado à cidade de Coimbra, Portugal.

Mourão *et al.* (2009) propuseram duas heurísticas de duas fases e um método de melhor inserção para resolver um problema de roteamento de arco setorizado (SARC) para a coleta de RSD. No SARC, a rede da rua é dividida em uma série de setores, e, em seguida, um conjunto de viagens de veículos é construído em cada setor que visa minimizar a duração total das viagens. Detofeno e Steiner (2009) apresentaram uma metodologia para a obtenção de uma solução otimizada do problema de geração de rotas na coleta de resíduos urbanos. Eles utilizaram o algoritmo de designação de Gillett e Johnson, considerando a restrição de capacidade. Zamorano *et al.* (2009) propuseram um procedimento em três fases usando o *software* ArcGis, onde na fase 1, foi criada uma rede de ruas, na fase 2 foram otimizados os locais de contêineres de resíduos municipais e na fase 3 calculou-se o caminho mais curto para a coleta dos contêineres. Ogwueleka (2009) propôs um método heurístico para a geração de soluções factíveis, utilizados no problema *Extended Capacitated Arc Routing Problem*. O processo heurístico consiste no método *route first, cluster second*. O objetivo do método era minimizar o custo total representado pela distância percorrida pelo veícu-

lo. Ele apresentou um estudo de caso da cidade de Onitsha, na Nigéria.

Arribas *et al.* (2010) apresentaram um estudo de caso na cidade de Santiago, Chile, e propuseram uma heurística que considera o tráfego na cidade e, assim, designam locais de coleta de zonas com tráfego intenso para fora do horário de pico. Bonomo *et al.* (2012) trataram o problema de coleta de RSD como um Problema do Caixeiro Viajante. Eles desenvolveram um estudo de caso aplicando o método para a zona sul da cidade de Buenos Aires, Argentina. O método proposto incorpora no objetivo a redução do desgaste do veículo medido pelo conceito físico de trabalho mecânico.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE COLETA DE RESÍDUO SÓLIDO DOMICILIAR ESTUDADO

A heurística proposta neste artigo foi aplicada no município de Cariacica, no estado do Espírito Santo, que possui 176 (cento e setenta e seis) bairros. A base de dados utilizada foi cedida pelo Governo do Espírito Santo denominada GEOBASES que contém as principais características viárias. Dentre estas, citam-se: extensão do logradouro, nome do logradouro, nome do bairro, número de domicílios. As velocidades dos caminhões foram informadas pela Prefeitura Municipal de Cariacica e são: 20 km/h durante o serviço de coleta e 40 km/h em circulação sem realizar coleta. O tempo gasto para coleta em cada rua foi calculado dividindo a extensão do logradouro pela velocidade. De modo análogo, calculou-se o tempo gasto pelo veículo para circular sem realizar o serviço de coleta.

Para calcular o número de domicílios por logradouros é utilizada a fórmula $NDom = ExtRua / 7,5$ (CARVALHO, 2001) onde $NDom$ é o número de domicílios na rua, e $ExtRua$ é a extensão de cada rua e 7,5 é a metragem média adotada para o comprimento de frente de um terreno. Com este valor, pode-se estimar a quantidade de resíduo sólido coletada em cada logradouro. Assim, a quantidade de resíduo sólido gerada em cada logradouro foi estimada por meio da fórmula $Qtresiduo = NDom * NMha * QLiha$ onde $Qtresiduo$ é a quantidade total coletada de resíduo sólido

do, *NDom* é o número de domicílios na rua, *NMha* é o número médio de habitantes por domicílio e *QLiha* é a quantidade de resíduo sólido gerado por habitante por dia. No Espírito Santo, segundo IBGE (2005) o *NMha* é estabelecido em 3,10 hab/dom e segundo IBGE (2000) o *QLiha* é estabelecido em 0,65ton/hab dia.

A empresa contratada opera com dez caminhões com prensa utilizados para atender a região e cada um possui capacidade máxima de 10.000,00 quilos. No entanto, a recomendação da prefeitura é que os caminhões não ultrapassem a 8.000,00 quilos por questões de segurança, sendo este valor adotado como referência neste artigo. Para cada caminhão, existe uma equipe de coletores com carga horária de turno de trabalho de 06 (seis) horas em escalas.

Atualmente a elaboração destes roteiros é feita de forma empírica de acordo com a demanda que surge em função do crescimento da população ou das necessidades impostas pelas características da região. Na maioria dos casos os roteiros propostos são alternados, ou seja, um determinado bairro ou distrito atendido num dia só voltará a ser atendido depois de 48 horas chegando até 72,0 horas em alguns bairros. A prefeitura deseja que a coleta de resíduos domiciliares seja realizada de forma regular em todos os bairros o máximo de vezes possível sem aumentar a frota. Se o objetivo for alcançado com uma frota de caminhões menor, isto incidirá em menores custos no transporte, além de evitar a retenção do tráfego em uma cidade com problemas de trânsito e, também, ajudando a minimizar a poluição ambiental.

A partir das rotas resultantes serão verificados se os caminhões foram melhor utilizados por tempo de trabalho ou pela quantidade de carga coletada. Uma maneira que a prefeitura percebe como uma possível mudança que pode gerar uma melhoria no serviço é a realização de diversas viagens por um mesmo caminhão durante o turno de trabalho de 6 horas da equipe de trabalho do caminhão. Desta forma, aproveita-se melhor o turno de trabalho da equipe de cada caminhão e conseqüentemente do próprio caminhão. Isso deve-se ao fato que, caso a rota termine porque o caminhão atingiu o limite máximo de carga, pode ser que ainda haja um tempo disponível para o caminhão e sua equipe realizar outras viagens de coleta. Atualmente esta possibilidade não está sendo contemplada.

5 HEURÍSTICA PROPOSTA

Com base nos dados levantados e na percepção da própria prefeitura, este artigo propõe uma heurística para resolver o PCCC-MV. Usouse a linguagem C como ferramenta de desenvolvimento da heurística proposta. O grafo representativo da rede viária do município de Cariacica-ES foi gerado pelo *software* TRANSCAD onde foi inserida a base de dados georeferenciada do sistema público GEOBASES e foram escolhidas as regiões a serem atendidas pela coleta de RSD.

Tendo em vista que a frota de dez caminhões possa não atender a todos os logradouros em um único turno de seis horas, faz-se necessário que a heurística seja executada para vários turnos até que todos os logradouros tenham sido atendidos e, assim, possa se saber também quantos turnos de trabalho são necessários para atender a toda demanda de recolhimento de RSD.

Nestas seis horas é admitida uma tolerância de 15 minutos adicionais em função do banco de horas dos empregados. A geração de rotas teve como objetivo atender aos seguintes critérios: 1º) Rota com maior aproveitamento da lotação do caminhão; 2º) Rota de menor tempo de percurso total; 3º) Rota com o menor número de passagens por logradouros sem coleta de resíduo sólido. O terceiro fator a compor o objetivo visa evitar que um veículo carregado circule por ruas nas quais ele não vai coletar resíduo sólido, pois isso pode levar a contaminação da rua por algum tipo de resíduo sólido que caia nas ruas que não precisam ser atendidas.

A heurística proposta é dividida em sete etapas: 1) Geração das rotas iniciais de todos os caminhões até a sua capacidade máxima ou até sua jornada máxima no turno; 2) Identificar os caminhões que cumpriram toda a jornada máxima do turno e, portanto, não podem mais ser utilizados para outras rotas no mesmo turno; 3) Identificar os caminhões que terminaram a rota por ter tido sua capacidade máxima utilizada, porém não cumpriram toda a jornada máxima do turno e, portanto, podem ser utilizados para outras rotas no mesmo turno; 4) Para os caminhões identificados na etapa 3, deve-se subtrair a jornada máxima do turno do tempo percorrido em cada uma das rotas que ele irá realizar no turno e do tempo para descarregar em cada rota no depósito; 5) Caminhões com menos de uma hora disponível devem ser considerados como jornada do turno completa

pela inviabilidade de se construir rotas com menos de uma hora; 6) Zerar a demanda de coleta de resíduo sólido em todas as ruas (arcos) que foram atendidos por uma rota; 7) Com base nos tempos calculados na etapa 4, procede-se a geração de novas rotas por meio da etapa 1, considerando então o tempo disponível de cada caminhão para uma nova rota.

A heurística proposta pode ser visualizada no pseudocódigo apresentado na Figura 1 – Heurística proposta para aproveitamento de caminhões.

Como visto, inicialmente foram levantados todos os dados junto à Prefeitura Municipal de Cariacica e junto à empresa que opera o sistema de coleta de resíduos sólidos. Para a aplicação da heurística proposta, os parâmetros iniciais são: velocidade na via onde há coleta de resíduos (nesse caso, considera-se que todas as vias possuem demanda para o serviço e, portanto, serão atendidas); o tempo gasto no atendimento de cada rua; o tempo de se atravessar uma rua que não necessite de atendimento; o tempo para atravessar uma rua ao realizar a coleta; identificação da via a ser atendida e o bairro ao qual pertence; turno de trabalho de cada equipe responsável por um caminhão; quantidade de resíduo a ser coletado em cada via; identificação da garagem ou do depósito onde o caminhão descarregará. Além disso, foram identificadas a frota de caminhões e sua respectiva capacidade.

6 APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Para facilitar a análise de interpretação dos resultados, definiu-se como grupo o conjunto de rotas geradas para os dez caminhões, incluindo o reaproveitamento, em um turno de seis horas. Assim, após a execução da metodologia, a heurística gerou sete grupos que utilizaram os dez caminhões disponíveis, já considerado nestes grupos o reaproveitamento da frota, para atender a demanda de coleta de RSD de todos os logradouros do município. Visando a análise dos resultados, para todos os grupos foram tabulados os resultados com o objetivo de identificar em cada fase o total de resíduo coletado, os tempos de operação e viagem, dentre outros. Nas Tabelas 1 e 2 podem ser

vistos os resumos dos principais resultados alcançados pela heurística.

Para o turno considerado de seis horas, pôde-se constatar que a heurística gerou para quase todos os sete grupos, com exceção do Grupo 7, duas fases, a primeira com o tempo de turno sendo usado parcialmente e a outra com a quantidade de horas a serem reaproveitadas. Como cada um dos sete grupos equivale a um turno de seis horas diárias e, por dia só existem quatro turnos diários de seis horas, percebe-se que, com 10 caminhões, a frequência de visitas a cada rua deve ser igual ou superior a 48 horas e, assim, o que se deseja é distribuir esses grupos ao longo da semana para se obter uma maior frequência de atendimentos por semana a cada rua do município.

Com base no problema de roteirização periódica, foi elaborada uma distribuição dos grupos definidos formando um cronograma periódico de atendimento considerando a possibilidade de atendimento diário conforme as escalas de trabalho dos quatro turnos, a saber: 06h00-12h00, 12h00-18h00, 18h00-00h00 e 00h00-06h00. De posse das informações, os grupos foram distribuídos de forma que se tenha atendimento a quatro grupos diariamente. Considerando que são possíveis quatro turnos diários, a periodicidade foi estabelecida como se segue: inicia-se no domingo o atendimento com os grupos 1, 2, 3 e 4. Para o dia seguinte, 2ª-feira, restam atender 5, 6 e 7. Porém, são atendidos quatro grupos diários, então existe a disponibilidade de atendimento de mais um grupo. Como todos já foram atendidos, reinicia-se com o Grupo 1 e assim sucessivamente. A Tabela 3 apresenta esta distribuição dia a dia da semana, incluindo os sábados e domingos. A distribuição proposta permite que todos os logradouros sejam atendidos pelo menos um dia sim e um dia não, quatro vezes na semana e tenham ao menos dois dias seguidos de atendimento.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia para um período de planejamento de uma semana. Pode-se observar que em média cada caminhão atende a duas rotas: uma utilizando a capacidade máxima do veículo (1ª fase) e outra fazendo o reaproveitamento da equipe que possui tempo de trabalho disponível (2ª fase).

```

Início da heurística
Grupo = 0
Enquanto houver arcos com demanda {
  Grupo = Grupo + 1;
  Fase = 0;
  Para todos os caminhões da frota {
    JornadaDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] = JornadaMáximaTurno+tolerânciabancohoras;
    CargaMáximaCaminhão[Grupo, Fase, Caminhão]= 8000;
    CaminhãoDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] = 1;
  }
  FrotaDisponível = 1;
  Faça enquanto FrotaDisponível = 1 {
    Fase = Fase + 1;
    Gerar Rotas com Base no PCCC
      com todos CaminhãoDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] = 1 enquanto
        Carga[Grupo, Fase, Rota] <= CargaMáximaCaminhão[Grupo, Fase, Caminhão] e Tempo[Grupo, Fase, Rota] <= JornadaDisponível[Grupo, Fase, Caminhão];
  }
  Para todas rotas geradas {
    Para todas os arcos da rota {
      Zerar a demanda de coleta no arco;
    }
    Se TempoRota[Grupo, Fase, Rota] = JornadaDisponível[Grupo, Fase, CaminhãoRota] {
      JornadaDisponível[Grupo, Fase, CaminhãoRota] = 0;
    }
    Senão {
      JornadaDisponível[Grupo, Fase, CaminhãoRota] =
        JornadaDisponível[Grupo, Fase, CaminhãoRota] - TempoRota[Grupo, Fase, Rota] - TempoDescarga;
    }
  }
  FrotaDisponível = 0;
  Para todos os caminhões da frota {
    Se JornadaDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] > 1 {
      FrotaDisponível = 1;
      CaminhãoDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] = 1;
    }
    CaminhãoDisponível[Grupo, Fase, Caminhão] = 0;
  }
}
}
Fim da heurística

```

Figura 1- Heurística proposta para aproveitamento dos caminhões

Tabela 1 - Resumo dos valores alcançados pela heurística para os Grupos 1, 2, 3 e 4

Resumo 1º Grupo					Resumo 2º Grupo				
Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno	Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno
Caminhão 1	9598,43	04:47	01:09	05:56	Caminhão 1	9230,29	04:53	00:52	05:45
Caminhão 2	9609,03	04:24	01:03	05:27	Caminhão 2	9301,50	04:40	01:18	05:58
Caminhão 3	9622,14	04:25	01:27	05:52	Caminhão 3	9305,06	04:40	01:11	05:51
Caminhão 4	9629,07	04:26	01:32	05:58	Caminhão 4	9285,58	04:43	01:18	06:01
Caminhão 5	9629,80	04:30	01:30	06:00	Caminhão 5	9306,87	04:27	01:03	05:30
Caminhão 6	9633,64	04:38	01:26	06:04	Caminhão 6	9307,54	04:31	00:58	05:29
Caminhão 7	9634,27	04:31	01:31	06:02	Caminhão 7	9307,92	04:43	01:10	05:53
Caminhão 8	9635,97	04:26	01:44	06:10	Caminhão 8	9308,29	04:49	01:10	05:59
Caminhão 9	9637,20	04:26	01:27	05:53	Caminhão 9	9308,10	04:16	01:05	05:21
Caminhão 10	9632,27	04:26	01:33	05:59	Caminhão 10	9310,38	04:26	01:18	05:44
Resumo 3º Grupo					Resumo 4º Grupo				
Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno	Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno
Caminhão 1	8936,41	04:08	01:23	05:31	Caminhão 1	8485,18	05:13	00:49	06:02
Caminhão 2	8981,22	04:25	01:14	05:39	Caminhão 2	8675,49	04:45	00:59	05:44
Caminhão 3	8937,93	05:25	00:59	06:24	Caminhão 3	8688,37	04:52	01:09	06:01
Caminhão 4	8988,37	05:05	00:55	06:00	Caminhão 4	8694,94	04:33	01:09	05:42
Caminhão 5	8989,76	04:44	01:00	05:44	Caminhão 5	8695,28	04:53	00:53	05:46
Caminhão 6	8998,54	04:30	00:56	05:26	Caminhão 6	8699,59	05:08	00:49	05:57
Caminhão 7	8998,24	04:22	01:05	05:27	Caminhão 7	8696,75	04:50	01:06	05:56
Caminhão 8	9001,96	04:55	01:06	06:01	Caminhão 8	8698,15	05:21	00:47	06:08
Caminhão 9	9001,73	04:47	01:09	05:56	Caminhão 9	8698,11	05:17	00:42	05:59
Caminhão 10	9002,68	04:28	01:01	05:29	Caminhão 10	8699,19	04:33	01:08	05:41

Tabela 2 - Resumo dos valores alcançados pela heurística para os Grupos 5, 6 e 7

Resumo 5º Grupo					Resumo 6º Grupo				
Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno	Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno
Caminhão 1	8485,28	04:36	01:22	05:58	Caminhão 1	8291,65	05:29	00:31	06:00
Caminhão 2	8484,25	05:28	00:47	06:15	Caminhão 2	8272,91	05:22	00:43	06:05
Caminhão 3	7997,13	06:02	00:00	06:02	Caminhão 3	7998,88	05:58	-	05:58
Caminhão 4	8495,47	04:45	01:13	05:58	Caminhão 4	8291,43	04:43	01:11	05:54
Caminhão 5	7996,03	05:53	00:00	05:53	Caminhão 5	7997,09	06:02	-	06:02
Caminhão 6	8495,63	05:30	00:43	06:13	Caminhão 6	8290,16	05:43	01:11	06:54
Caminhão 7	8493,60	05:20	00:38	05:58	Caminhão 7	8287,59	04:27	01:11	05:38
Caminhão 8	8500,90	04:38	00:43	05:21	Caminhão 8	8290,47	05:20	00:39	05:59
Caminhão 9	8498,22	04:49	01:08	05:57	Caminhão 9	8288,71	04:39	01:17	05:56
Caminhão 10	8498,43	04:27	01:03	05:30	Caminhão 10	8286,75	05:14	01:17	06:31
Resumo 7º Grupo									
Caminhões utilizados	Resíduo coletado pela equipe	Tempo total gasto 1ª FASE	Tempo total gasto 2ª FASE	Tempo total utilizado do turno					
Caminhão 1	5959,63	04:21	00:00	04:21					
Caminhão 2	6263,43	06:33	00:00	06:33					
Caminhão 3	5972,65	04:26	00:00	04:26					
Caminhão 4	6269,91	04:08	00:00	04:08					
Caminhão 5	6272,60	05:24	00:00	05:24					
Caminhão 6	6278,58	05:53	00:00	05:53					
Caminhão 7	6279,34	05:14	00:00	05:14					
Caminhão 8	6279,92	04:21	00:00	04:21					
Caminhão 9	6375,13	04:50	00:00	04:50					
Caminhão 10	8330,35	03:47	00:00	03:47					

Tabela 3 - Tabela de periodicidade de atendimento às ruas do município

Dia da semana Turno	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
06h 00 - 12h 00	Grupo 1	Grupo 5	Grupo 2	Grupo 6	Grupo 3	Grupo 7	Grupo 4
12 h 00 - 18h 00	Grupo 2	Grupo 6	Grupo 3	Grupo 7	Grupo 4	Grupo 1	Grupo 5
18h 00 - 00h 00	Grupo 3	Grupo 7	Grupo 4	Grupo 1	Grupo 5	Grupo 2	Grupo 6
00h 00 - 06h 00	Grupo 4	Grupo 1	Grupo 5	Grupo 2	Grupo 6	Grupo 3	Grupo 7

Tabela 4 - Resumo dos resultados alcançados com a metodologia proposta

Grupos	Periodi- cidade semanal	Roterios Gerados na 1ª fase		Roterios Gerados na 2ª fase		Total Grupo	
		Núm. de caminhões utilizados	Resíduo coletado por grupo (Kg)	Núm. de caminhões reaproveitados	Resíduo coletado por Grupo (Kg)	Resíduo médio por grupo por caminhão (kg)	Resíduo total por semana por Grupo (Kg)
Grupo 1	4	10	79.994,77	10	16.267,04	9.626,18	385.047,26
Grupo 2	4	10	79.978,85	10	12.992,68	9.297,15	371.886,12
Grupo 3	4	10	79.983,84	10	9.853,02	8.983,69	359.347,45
Grupo 4	4	10	79.971,50	10	6.759,55	8.673,10	346.924,19
Grupo 5	4	10	79.953,83	8	3.991,11	8.394,49	335.779,76
Grupo 6	4	10	79.950,57	6	2.345,08	8.229,57	329.182,61
Grupo 7	4	10	61.936,45	0	0,00	6.193,65	247.745,80
Totais:			541.769,81		52.208,49		2.375.913,18

Durante a semana são coletados 2.375.913,18 quilos de RSD do município. Na 1ª fase são coletados por todos os grupos 541.769,81 quilos; como cada grupo atende quatro vezes o município, tem-se que na 1ª fase são coletados 2.167.079,22 quilos por semana. Já na 2ª fase são coletados por todos os grupos 52.208,49 quilos; como cada grupo atende quatro vezes o município, tem-se que na 2ª fase são coletados 208.833,96 quilos por semana. Na 2ª fase a metodologia propôs uma coleta adicional de 208.833,96 quilos de resíduos, o que equivale a aproximadamente 26,1 viagens a mais por caminhão semanalmente e um adicional de 9,65% da capacidade em quilos da frota, ou seja, dois ganhos importantes que a heurística conseguiu trazer para a prefeitura.

Os gráficos da Figura 2 apresentam as médias dos caminhões em cada grupo. Observa-se que a quantidade média de resíduo coletado em cada grupo vai decrescendo. Isto ocorre, pois a heurística tenta atender sempre os logradouros mais pertos primeiro e, assim, os primeiros grupos

atendem a estes pontos, logo, os grupos posteriores são obrigados a viajar mais para coletar os resíduos de logradouros mais distantes.

Observa-se também, que o tempo médio gasto em cada viagem é sempre em torno de seis horas, o que torna os roteiros propostos viáveis já que a escala de trabalho das equipes é de seis horas para cada grupo. Isto demonstra também que a heurística sempre tenta aproveitar ao máximo o turno de trabalho da equipe fazendo com que o caminhão circule mais. Corroborando com isso, percebe-se que no Grupo 7 tem-se o menor valor alcançado, isto se devendo ao fato de não ter havido uma 2ª fase neste grupo, pois todos os pontos já haviam sido atendidos.

No Grupo 3 o tempo médio de rota foi um dos mais baixos, 5h37, isto porque em algumas rotas propostas ainda seria possível incluir uma 3ª fase para aproveitar tempos ociosos de algumas equipes, fato o qual a heurística não contemplou. Optou-se por manter apenas 2 fases por ser o melhor resultado alcançado após todo o estudo feito. Somente o Grupo 7 teve um tempo menor que o

Grupo 3, isso se devendo ao fato que o Grupo 7 foi construído com poucas ruas a serem percorridas, pois a maioria já havia sido atendida pelos outros grupos.

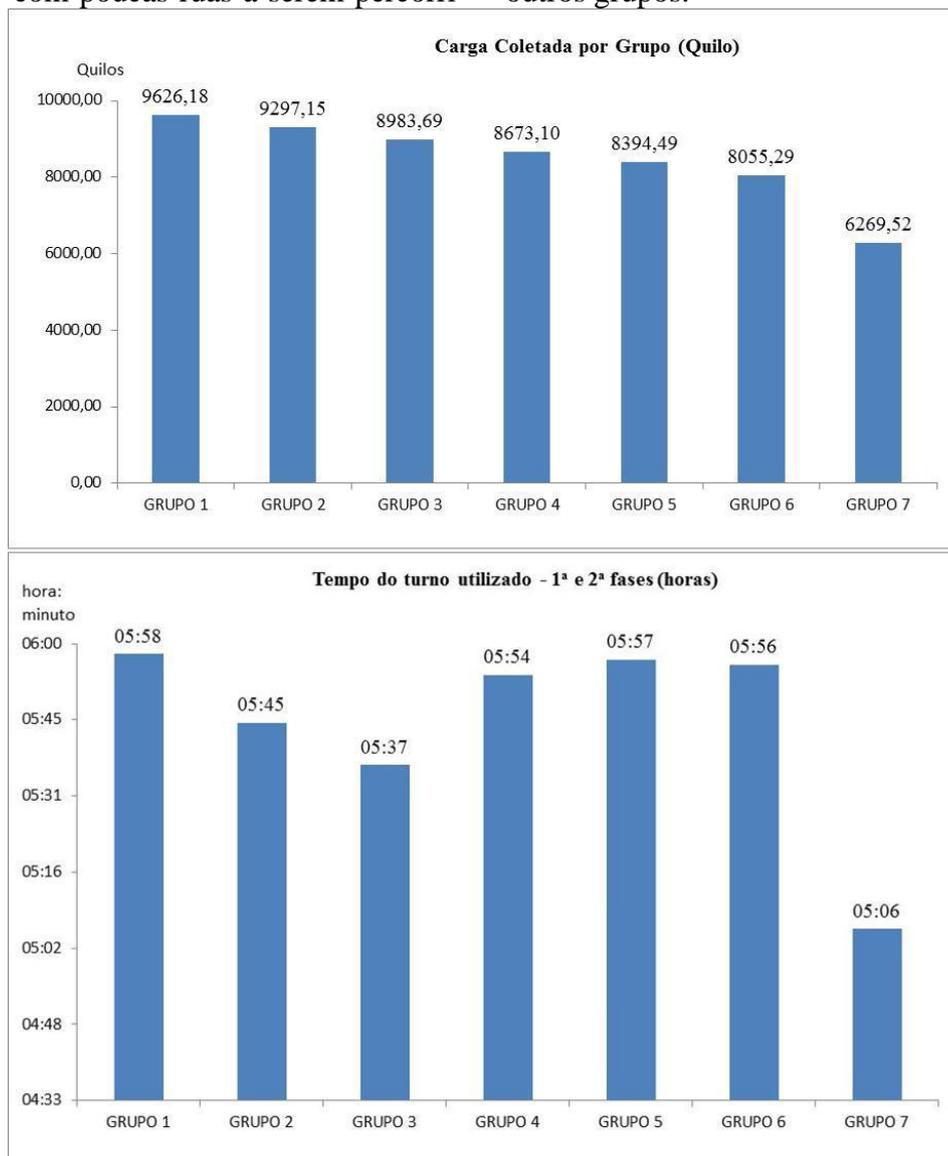


Figura 2 - Peso médio de resíduo domiciliar coletado em cada grupo

Assim, o atendimento aos 176 bairros foi organizado em sete grupos com quatro turnos diários: o primeiro turno é de 6h00 as 12h00, o segundo de 12h00-18h00, o terceiro de 18h00-00h00 e o quarto de 00h00-06h00. O reaproveitamento dos caminhões foi alcançado já que em praticamente todas as rotas propostas o tempo ainda disponível de uma equipe após a realização de uma rota foi utilizado para atender rotas menores.

7 CONCLUSÕES

Foi percebido nos levantamentos realizados junto à Prefeitura Municipal de Cariacica-ES que muitas das ferramentas disponíveis para a geração de rotas para recolhimento de RSD geravam uma única rota por turno de trabalho e, por conta dis-

so, existia um tempo que o caminhão e a equipe ficavam ociosos entre o término da primeira viagem e o fim do horário do turno. Visando aproveitar este tempo ocioso, este artigo propôs uma nova heurística para criar os roteiros de coleta de RSD que tivesse como característica o reaproveitamento do tempo ocioso após a primeira viagem de cada veículo. Esta heurística proposta gera vários roteiros por turno trabalhado, ou seja, realizando múltiplas viagens, o que passou a ser denominado como Problema do Carteiro Chinês Capacitado Múltiplas Viagens (PCCC-MV).

Para avaliar a heurística proposta foram utilizados dados reais da Prefeitura de Cariacica-ES e testes computacionais foram realizados visando gerar um plano de recolhimento de RSD para a prefeitura. A partir destes testes foi possível verificar que a nova heurística conseguiu gerar um

plano de recolhimento de RSD que gerou um ganho de aproximadamente 26,1 viagens por semana a mais por caminhão e um adicional de 9,65% da capacidade em quilos da frota, ou seja, dois ganhos importantes que a heurística conseguiu trazer para a Prefeitura de Cariacica-ES.

Isso mostra que a heurística proposta é viável e pode ser usada para melhorar o uso da frota e da jornada de trabalho das equipes, proporcionando à prefeitura a um mesmo custo, ou eventualmente a um custo menor, uma maior capacidade de atendimento à população, melhorando o meio ambiente e eventualmente reduzindo doenças pela exposição dos resíduos por muito tempo nos logradouros por falta de coleta adequada.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio via a bolsa Pesquisador Capixaba nº 458/2013 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – Processo nº 477357/2013-0.

REFERÊNCIAS

AMPONSAH, S.K.; SALHI, S. The investigation of a class of capacitated arc routing problems: the collection of garbage in developing countries. *Waste Management*, 2004, v. 24, p. 711-721.

[DOI: 10.1016/j.wasman.2004.01.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.008)

ARAÚJO, R.R. Um modelo de resolução para o problema de roteirização em arcos com restrição de capacidade. Porto Alegre, 177 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ARRIBAS, C.A.; BLAZQUEZ, C.A.; LAMAS, A. Urban solid waste collection system using mathematical modeling and tools of geographic information systems. *Waste Management and Research*, v. 28, n. 4, 2010, p. 355-363.

[DOI: 10.1177/0734242X09353435](https://doi.org/10.1177/0734242X09353435)

BAUTISTA, J.; PEREIRA, J. Ant algorithms for urban waste collection routing. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. Proceedings, v. 3172, 2004, p. 302-309.

[DOI: 10.1007/978-3-540-28646-2_28](https://doi.org/10.1007/978-3-540-28646-2_28)

BAUTISTA, J.; FERNANDEZ, E.; PEREIRA, J. Solving an urban waste collection problem using ants heuristics. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 9, 2008, p. 3020-3033.

[DOI: 10.1016/j.cor.2007.01.029](https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.029)

BELTRAMI, E.J.; BODIN, L.D. Networks and Vehicles Routing for Municipal Waste Collection. *Networks*, v. 4, 1974, p. 65-94.

[DOI: 10.1002/net.3230040106](https://doi.org/10.1002/net.3230040106)

BENAVENT, E.; CEMPOS, V.; CORBERÁN, A.; MOTA, E. The Capacitated Arc Routing Problem. A Heuristic Algorithm. *QUÉSTIÓ*, V. 14, N. 1, 2, 3, 1990, p. 107-122.

BONOMO, F.; DURÁN, G.; LARUMBE, F.; MARENCO, J. A method for optimizing waste collection using mathematical pro-

gramming: a Buenos Aires case study. *Waste Management and Research*, v. 30, n. 3, 2012, p. 311-324.

[DOI: 10.1177/0734242X11402870](https://doi.org/10.1177/0734242X11402870)

BRITO, R.A.F. Uso de Sistema de Informação Geográfica para a Análise do Transporte e Disposição Final dos Resíduos Sólidos. São Paulo, 100 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2006.

CARVALHO, L.E.X.; Desenvolvimento de solução integrada de sistemas de limpeza urbana em ambiente SIG. Rio de Janeiro, 340 p. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

CASTRO, L.B. Avaliação do serviço de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidade de médio porte utilizando sistemas de informações geográficas e receptores do sistema de posicionamento por satélite. Uberlândia, 141 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

CHRISTOFIDES, N.; BENAVENT, E.; CAMPOS, A.; CORBRAN, A.; MOTA, E. An optimal method for the mixed postman problem. Proceedings of the 11th IFIP Conference, Copenhagen, Denmark, 1983, p. 641-649.

[DOI: 10.1007/BFb0008937](https://doi.org/10.1007/BFb0008937)

CORDEIRO, M. G. Um tratamento heurístico para o problema do carteiro chinês com restrições de capacidade e tempo: uma aplicação em otimização de rotas para coleta de resíduos domiciliares. Vitória, 91 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

CUNHA, C.B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *Transportes*, Rio de Janeiro, v.8, n.2, 2000, p.51-74.

DETOFENO, T.C.; STEINER, M.T.A. Otimização das Rotas de Coleta de Resíduos Urbanos, utilizando Técnicas de Pesquisa Operacional. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 20, 2009, Porto Seguro.

FERREIRA, J.A. Resíduos Sólidos: Perspectivas Atuais. In: Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar, Rio de Janeiro, Editora Fiocruz, 2000, p. 142.

FILHO, M. G.; JUNQUEIRA, R.A.R. Problema do Carteiro Chinês: escolha de métodos de solução e análise de tempos computacionais. *Revista Produção*, v. 16, n. 3, 2006, p. 538-551.

[DOI: 10.1590/S0103-65132006000300014](https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000300014)

GHIANI, G.; GUERRIERO, F.; IMPROTA, G.; MUSMANNO, R. Waste collection in Southern Italy: solution of a real-life arc routing problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 12, p. 135-144, 2005.

[DOI: 10.1111/j.1475-3995.2005.00494.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2005.00494.x)

GOLDEN BL, WONG RT. Capacitated arc routing problems. *Networks*, 1981, 11: 305-315. [DOI: 10.1002/net.3230110308](https://doi.org/10.1002/net.3230110308)

GOTTINGER, H.W. A computational model for solid waste management with application. *European Journal of Operations Research*, v. 35, 1988, p. 350-364.

[DOI: 10.1016/0377-2217\(88\)90225-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90225-1)

IBGE. Pesquisa Nacional de Amostras por Domicílio – PNAD. Rio de Janeiro 2005.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro 2008. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/noticias/mcidades-e-ibge-realizam-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico-2008/>

- KULCAR, T. Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research*, v. 90, 1996, p. 71-77. DOI: [10.1016/0377-2217\(94\)00311-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00311-4)
- LACERDA, M.G. Análise de uso de SIG no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em uma cidade de pequeno porte. São Paulo, 158 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2003.
- LI, J.Q.; BORENSTEIN, D. MIRCHANDANI, P.B. Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil. *OMEGA The International Journal of Management Science*, Elsevier, 2006; p. 16. DOI: [10.1016/j.omega.2006.04.007](https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.04.007)
- LONGO, H.; ARAGÃO, M.P.; UCHOA, E. Solving Capacitated Arc Routing Problems using a transformation to the CVRP. *Computers & Operations Research*, 2006, v. 33, n. 6, pp. 1823-1837. DOI: [10.1016/j.cor.2004.11.020](https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.11.020)
- MANIEZZO, V. Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support. UBLCS Technical Report Series, Bolonha, Italy: University of Bolonha, 2004, p.27.
- MANIEZZO, V., ROFFILLI, M. Algorithms for large directed capacitated arc routing instances: Urban solid waste collection operational support”, In *Recent advances in evolutionary computation for combinatorial optimization*, C. Cotta and J.van Hemert (Editors), *Studies in Computational Intelligence* 153, Springer, 2008, pp. 259–274. DOI: [10.1007/978-3-540-70807-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70807-0_16)
- MELO, A.C.S.; FILHO, V.J.M.F. Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos. *Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, COPPE, 2001, v.21, n. 02, p. 223-232. DOI: [10.1590/S0101-74382001000200007](https://doi.org/10.1590/S0101-74382001000200007)
- MOURA, M.C; FONTES, A.A.; RIBEIRO, C.A.A.S. Determinação da Melhor Rota para Coleta Seletiva de Lixo no Campus da Universidade Federal de Viçosa utilizando dos Sistemas de Informações Geográficas. *Anais X SBSR, Foz do Iguaçu, INPE*, 2001, p. 1119-1125.
- MOURÃO, M. C.; NUNES, A. C.; PRINS, C. Heuristic methods for the sectoring arc routing problem. *European Journal of Operational Research*, 2009, v. 196, n. 3, p. 856-868. DOI: [10.1016/j.ejor.2008.04.025](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.025)
- OGWUELEKA, T.C. Route optimization for solid waste collection: Onitsha (Nigeria) case study. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2009, V. 13, N.2, P. 37-40. DOI: [10.4314/jasem.v13i2.55299](https://doi.org/10.4314/jasem.v13i2.55299)
- PAES, F. G., ARICA, G. M. Um Tratamento GRASP Híbrido do Problema do Carteiro Chinês Misto (PCCM) Destinado a Otimização de Rotas para Coleta de Lixo Doméstico. Disponível em http://200.231.172.253/cnmac/storal2/frederico_paes_ST18.pdf. Acesso em 14 de novembro de 2007.
- SANTOS, L.; RODRIGUES, J.C. Implementação em SIG de uma Heurística para o Estudo da Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003, 24 p.
- SANTOS, L.; COUTINHO-RODRIGUES, J.; CURRENT, J. R. Implementing a multivehicle multi-route spatial decision support system for efficient trash collection in Portugal. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 2008, v. 42, n.6, p. 922-934. DOI: [10.1016/j.tra.2007.08.009](https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.08.009)
- SIMONETO, E.O.; BORENSTEIN, D. Gestão Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos – Abordagem Utilizando um Sistema de Apoio à Decisão. *Gestão & Produção*, v. 13, nº 3, p. 449-461, 2006. P. 103. DOI: [10.1590/S0104-530X2006000300008](https://doi.org/10.1590/S0104-530X2006000300008)
- TUNG, D.V.; PINNOI, A. Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. *European Journal of Operational Research*, 2000, V. 125, P. 449-468. DOI: [10.1016/S0377-2217\(99\)00408-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00408-7)
- ZAMORANO, M. MOLERO, E., GRINDLAY, A. RODRIGUEZ, M., HURTADO, A. A planning scenario for the application of geographical information systems in municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, 2009, v. 54, p. 123-133. DOI: [10.1016/j.resconrec.2009.07.001](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.001)