

Experiências com coleta de lixo domiciliar e aplicação de modelos do problema do carteiro chinês misto: estudo de caso no Jardim Europa

ALEXANDRE RIGONATTI*
JOÃO AMILCAR VIANA RODRIGUES,
PABLO LUIS FERNANDES BATISTA,
MARCOS JOSÉ NEGREIROS GOMES**

Este artigo considera o problema do carteiro chinês aplicado ao contexto da coleta de lixo domiciliar na cidade de São Paulo, especificamente na região de Jardim Europa. Mostra-se como foi realizado um levantamento de situação da coleta de lixo, a partir de planos de coleta diária da prefeitura da capital paulista. Utilizou-se a versão mista do problema para verificar os percursos eulerianos e o custo das rotas planejadas pela empresa executora do serviço, explorando-se os ambientes de modelagem Excel, LINGO e XnêS. Foram avaliadas 12 áreas de coleta diária, e acompanhadas em campo duas destas áreas. O trabalho revela as discrepâncias e inviabilidades do planejamento realizado e entregue à prefeitura pela empresa responsável. Revela-se também o resultado obtido com os “solvers”, e por fim discute-se a adequação da versão do carteiro chinês misto, aplicada na realidade da coleta.



INTRODUÇÃO

A coleta de lixo no Brasil é uma tarefa de responsabilidade das prefeituras municipais, a qual é executada normalmente e diariamente na grande maioria das cidades brasileiras. Dados de 2008 produzidos pelo IBGE indicam que 98% dos domicílios das zonas urbanas têm serviço de coleta de lixo, enquanto que apenas 23% dos domicílios são atendidos na zona rural. Dados da Abrelpe indicam que 54% de todo o lixo coletado no país está na região sudeste, e que o lixo coletado no Brasil em 2010 alcançou a taxa média de 306 kg/hab/ano, ou seja, o Brasil produz aproximadamente 160 000 toneladas de lixo por dia, segundo IBGE – 2012 e Abrelpe – 2012 (ver *figura 1*).

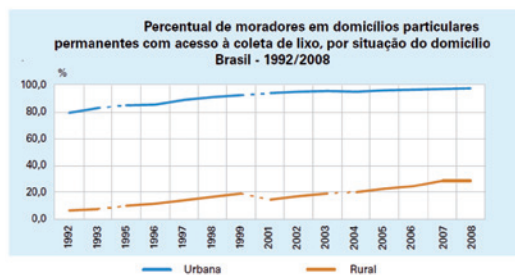
Estas marcas surpreendentes colocam o Brasil entre os maiores produtores de lixo do mundo, com dispêndio elevadíssimo da ordem de 4 bilhões de reais ano. O custo da coleta somente com equipamentos e pessoal indica ser aproximadamente 50% deste total, conforme IBAM (2001).

A eficiência do sistema de coleta urbana é muito importante, uma vez que se trata de uma tarefa que nas cidades é impossível de ser realizada nas regiões mais verticalizadas pela manhã e à tarde, haja vista os congestionamentos e a difícil missão de se fazer coleta de lixo porta em porta no horário noturno.

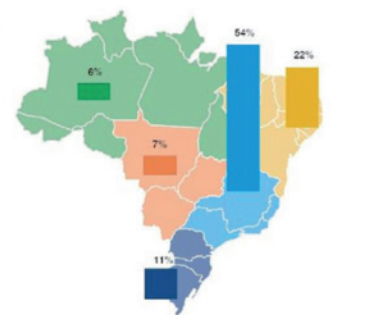
A cidade de São Paulo insere-se nesse contexto. Sua diversidade na ocupação urbana indica a necessidade de um enorme trabalho diário do sistema municipal de coleta de lixo. Em especial, na região do Jardim Europa, a coleta de lixo é realizada noturna e diariamente, tendo em vista sua grande verticalização e ocupação, onde se misturam comércios dos mais diversos tipos e condomínios de todos os tamanhos neste cenário. A região está dividida em várias áreas de serviço. Tomamos 12 delas para este estudo. Veículos de 12 e 19 toneladas atendem a região a partir das 19h00 indo até às 4h30 da manhã do dia seguinte. O serviço é realizado de forma frenética de segunda a sábado, sem feriados, com uma tripulação composta de um motorista e três ou quatro coletores por veículo.

Normalmente a coleta é feita em quatro viagens nos piores dias, tendo cada área um circuito padrão projetado pela empresa concessionária do serviço (LOGA – Logística Ambiental de São Paulo S.A.), que indica como devem ser percorridas as ruas.

O projeto dos circuitos é executado quase que fielmente pelos motoristas que acompanhamos. Basicamente, eles usam



Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 1992/2008.



Fonte: Panorama ABRELPE 2008

Figura 1 - Panorama da coleta de lixo no Brasil (IBGE - 2012, Abrelpe - 2012)

como referência o trajeto que indica apenas uma rota base (com início e fim determinados), e toda vez que se faz o trajeto, quando o caminhão enche, o percurso é interrompido para o local de descarrego designado para tal. Ao retornar do descarrego, o motorista retoma o percurso de onde parou na rota anterior e assim procede até que seja concluída toda a área de coleta.

Apesar de ser um trabalho que presume um projeto prévio de rotas e análise de situação, este estudo identifica que os planos feitos pela empresa são muito falhos, e que precisam ser refeitos. Com isto deve-se dar ciência aos motoristas das diversas imprudências que cometem ao longo da realização de seus trajetos, e se reveja com propriedade a melhor forma de atender a cada área minimizando os custos de percurso, e ao mesmo tempo considerando as idiossincrasias associadas ao trabalho diário, tais como: flutuações de carga entre dias de coleta, disponibilidade e dificuldade da coleta pelos coletores, trânsito enquanto se faz a coleta, entre outras.

Além do aspecto relacionado à produção, este trabalho também realiza uma importante análise sobre o problema dos percursos. O formato de se usar um circuito básico (uma única rota suporte) é adotado em todo o país, inclusive previsto em manual produzido pelo governo federal, IBAM (2001). Infelizmente, porém, as indicações do manual (*figura 2*), são pouco elucidativas, levando-se em conta a topologia das cidades e as malhas viárias. Na verdade, as cidades têm geometrias bem diferentes à apresentada na *figura 2*, e mesmo que a estratégia heurística de percurso, “primeiro as horizontais e depois as verticais”, seja largamente adotada, não se encaixa na situação de extrema dificuldade de topológica que inclui também as restri-

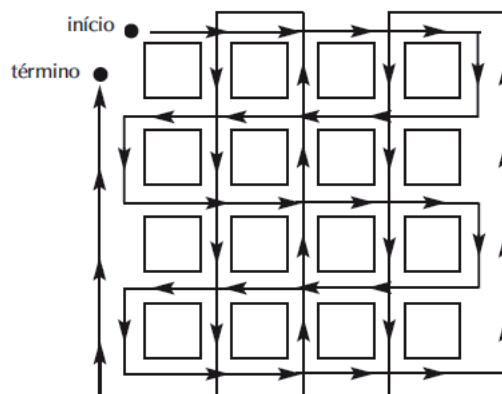


Figura 2 - Método heurístico de traçado de itinerários de coleta (Fonte: IBAM - 2001)

ções de mão única e de manobra (retorno, direita e esquerda).

Apesar do modo heurístico sugerido pelo manual ser adotado na maioria das empresas de coleta no Brasil, ao que conhecemos, a *figura 3* apresenta duas áreas de coleta da região de Jardim Europa na capital paulista (PI04 e PI06) onde as situações de percurso são desfavoráveis ao esquema heurístico proposto pelo IBAM.

Diante da situação, algumas perguntas advêm: (1) Como são os projetos de rotas da cidade de São Paulo, viáveis ou inviáveis? (2) De que modo eles podem ser otimizados? (3) Qual a melhor forma de realizá-los considerando a realidade da coleta em múltiplas viagens?

As respostas às perguntas acima podem nortear melhores projetos de rotas, usando recursos computacionais compatíveis com o problema, e que estejam disponíveis para tal. Este artigo pretende então responder as três perguntas acima, através da modelagem matemática do problema do carteiro chinês misto proposta por Kappauf & Koehler (1979), e usando os softwares Excel e LINGO. Também será usado o processo de modelagem visual interativa através do software Xnê, Microsoft, LIN-



Figura 3 - Situações desfavoráveis (PI04, PI06) ao percurso conforme heurística proposta pelo IBAM

DO Systems, Negreiros et al (2009).

O artigo está dividido como segue: na seção 2 descrevemos mais detalhadamente o trabalho que realizamos em campo no acompanhamento preliminar das rotas na região do Jardim Europa da cidade de São Paulo; na seção 3 colocamos diferentes formas de se fazer modelos para o problema do carteiro chinês misto usando softwares disponíveis ou de uso comum; na seção 4 avaliamos os resultados computacionais obtidos com os nossos modelos e pelos softwares utilizados, assim como comparamos ao que se indica ser o praticado pela empresa considerando os planos a nós disponibilizados pela prefeitura de São Paulo. Na seção 5 introduzimos a forma real com que vem sendo feita a coleta e a forma correta de se fazer o planejamento para este trabalho. Na seção 6 procedemos com as conclusões deste artigo.

SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DE ROTAS DE COLETA DE LIXO DE SÃO PAULO

Este trabalho de pesquisa iniciou com um projeto de TCC (Projeto de Final de Curso) do primeiro autor, onde lhe fora solicitado desenvolver uma aplicação para a coleta de lixo, utilizando modelagem matemática com Excel. A expectativa do orientador, prof. Leonardo Chwif, era de que uma planilha gráfica pudesse resolver o problema do carteiro chinês misto proposto através do modelo de Kappauf & Koehler (1979) apud Ahuja et al (1993), e ao mesmo tempo obter sinais importantes sobre o processo de produção de roteiros usando esta ferramenta, Rigonatti & Souza (2011).

Mapas e informações da Prefeitura de São Paulo

O aluno passou então a realizar a pesquisa, buscando inicialmente na prefeitura

mapas de rotas da coleta domiciliar. Tão grande a dificuldade de obtê-los, porém com insistência logrou êxito junto ao responsável, tendo o mesmo lhe passado um bom número de rotas (17) em plantas digitais no formato PDF.

Diante da quantidade de rotas que recebera, optou por realizar o seu trabalho curiosamente relacionado àquelas áreas de coleta próximas ao seu bairro. Imaginando poder facilitar o seu acesso e acompanhamento no campo, caso porventura fosse necessário fazê-lo.

O trabalho de acompanhamento em campo

Com os dados em mãos, procurou levantar as informações pertinentes à operação geral da coleta urbana. Inicialmente tentou conhecer a empresa, tendo muitas dificuldades de encontrar retorno no levantamento de custos operacionais como: gastos com pneus, combustível, manutenção, ou mesmo conhecer melhor os gastos com pessoal, início e fim de percursos etc. De fato não conseguiu muita coisa, porém focou na resolução dos modelos limitando-se a levantar as distâncias dos segmentos de rua, ou seja, o grafo associado a cada instância do problema. Para isso usou o Google Maps, um serviço web de pesquisa e visualização de mapas, onde obteve imagens das regiões das rotas escolhidas. Dessa forma foi possível conhecer as distâncias entre os nós da rede viária e entender cada rota, ou seja, descobrir o sentido das vias e entender porque o caminhão não passa em algumas ruas, pois poderiam ser estreitas demais ou não necessitaria de serviço, Rogonatti & Souza (2011).

Digitalização dos grafos e dificuldades encontradas

O trabalho de digitalização das redes em Excel foi então começado, fazendo-se as medidas segmento a segmento de

rua pelo Google Maps, indicando-se na planilha os cruzamentos (vértices), os segmentos de rua (arcos – ruas de mão única e elos – ruas de mão dupla). O penoso trabalho de construir o grafo mnemonicamente, levou-o a buscar alternativas, tendo encontrado o sistema Xnês e o apoio dos pesquisadores do projeto na elaboração do seu TCC usando esta ferramenta e a proposta pelo professor da disciplina.

A equipe do projeto Xnês, identificou vários problemas na interface que impediam o bom desempenho do sistema. Com o apoio do aluno, foi então possível ajustar o sistema para o bom uso, atualizar as versões disponíveis e incluir explicações para novos alunos de outras faculdades brasileiras, que também utilizaram a ferramenta para propósito semelhante, no mesmo período.

MODELOS DE ROTAS

O modelo matemático mais apropriado para o problema do carteiro chinês misto, considera a propriedade de unicursalidade de um grafo misto. Esta propriedade indica que um circuito euleriano pode ser realizado em um grafo qualquer se a quantidade de ligações que entram e saem de qualquer vértice é conservativa, ou seja, indica que haverá um circuito com equilíbrio de fluxo em todo vértice da rede, sem alterar as propriedades do grafo, Eilselt et al (1995).

Podemos descrever melhor esta propriedade do modo abaixo.

Unicursalidade – Seja G um grafo f -conexo. G é dito unicursal ou euleriano se existe um caminho fechado em G contendo cada aresta apenas uma vez e cada vértice pelo menos uma vez. As condições necessárias e suficientes para que um grafo f -conexo seja euleriano são dadas como segue abaixo.

- 1) Se G é não orientado (simétrico), todo vértice deve ter grau par, ou seja, um número par de elos incidentes – Teorema de Euler.
- 2) Se G é orientado, o número de arcos entrando e saindo de cada vértice é igual – Teorema de Ford & Fulkerson, Ford & Fulkerson (1962).
- 3) Se G é misto, todo vértice em S deve conter um número par de arcos orientados a ele ligados; além disso, para todo conjunto $S \subseteq V$, a diferença entre o número de arcos de S para $V-S$ e o número de arcos de $V-S$ para S deve ser menor do que ou igual ao número de elos ligando S e $(V-S)$ – Condições de balanceamento, Nobert & Picard (1996).

O Modelo Matemático Unicursal de Kappauf & Koehler (1979)

O modelo matemático para o problema

do carteiro chinês misto proposto por Kappauf & Koehler (1979) pode ser descrito como segue abaixo.

(PCC-Misto) Minimizar

$$\sum_{\langle v_i, v_j \rangle \in A} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(v_i, v_j) \in E^+} c_{ij} x_{e^+} + \sum_{(v_i, v_j) \in E^-} c_{ij} x_{e^-} \quad (1)$$

$$\text{sujeito a, } \sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_{ji} = 0, \forall j \in V \quad (2)$$

$$x_a \geq 1, \forall a \in A \quad (3)$$

$$x_{e^+} + x_{e^-} \geq 1, \forall e \in E \quad (4)$$

$$x_l \in \mathbb{N}, \forall l \in A \cup E^+ \cup E^- \quad (5)$$

Nesta formulação, na função objetivo (1) deseja-se minimizar a soma dos custos dos arcos atravessados, mais a soma dos elos atravessados num sentido E+ e noutro E-. As restrições (2) mantêm a unicursalidade dos vértices (equilíbrio de grau de entrada e saída dos vértices). As restrições (3) garantem que os arcos serão visitados pelo menos uma vez. As restrições (4) dizem que um elo deve ser atravessado pelo menos uma vez em um dos dois sentidos possíveis. E finalmente as restrições (5) dizem que o número de vezes que as ligações são utilizadas na solução, deve ser inteiro.

Método B&B do Xnês

A formulação no Xnês é um pouco diferente da anterior, pois o grafo é tratado como um grafo transformado de misto para um orientado. Na transformação, os elos se tornam triangulações orientadas, Sherafat (1988). A partir desta transformação o Xnês roda um algoritmo B&B baseado em fluxo em redes, que inicia com uma heurística gulosa e conclui com o método de B&B de Sherafat (1988), obtendo ao final de um tempo específico uma solução viável ou garantidamente ótima do problema.

No ambiente do sistema Xnês, o processo de criação de um grafo pode ser realizado utilizando-se imagens como pano de fundo (BMP) ou desenhos no formato DWG, e com isto podem ser gerados grafos mistos, onde são inicialmente inseridos os vértices e em seguida são incluídas as ligações. O processo de edição é bastante simples, objetivamente selecionando botões e selecionando com o mouse a posição do vértice. Os custos das ligações podem ser calculados diretamente, através

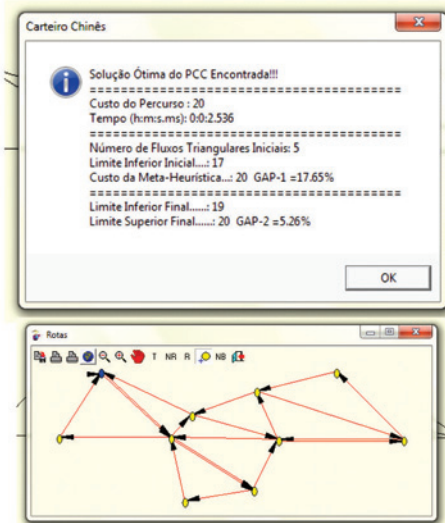
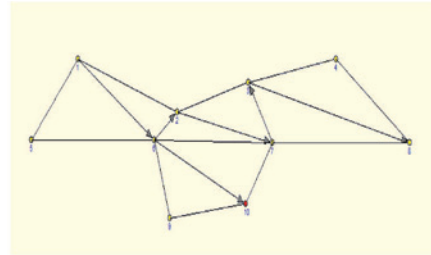


Figura 4 - Visualização dos recursos de solução do Xnês para um grafo dado (TESTE_MN)

da métrica euclidiana, ou através de edição manual dos custos por ligação (arcos e elos). O Xnês gera um arquivo texto (DAT) para ser usado em uma planilha, onde é possível rodar modelos pelo Excel ou no LINGO.

O Xnês, ao gerar a solução do grafo em uso, retorna o custo com os limites iniciais do problema e da solução heurística, assim como o custo final relativamente à melhor solução encontrada dentro do tempo estipulado pelo usuário. Retorna também o multigrafo do percurso euleriano que corresponde à solução encontrada (figura 4).

Modelagem com Excel

A formulação de Kappauf & Koehler (1979) pode ser feita em Excel de modo bastante simples, como mostra planilha da figura 5 a partir do exemplo do grafo da figura 4. O modelo indica as primeiras restrições de conservação de fluxo nos nós, em seguida temos as restrições de passagens mínimas sobre os arcos, e por fim as restrições de passagem sobre os elos.

Verificando os custos

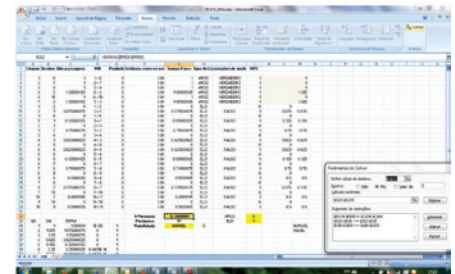
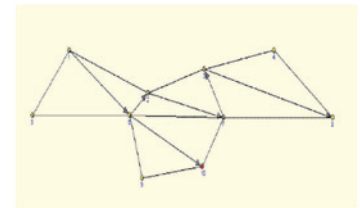


Figura 5 - Modelagem Kappauf & Koehler (1979) através do Excel

das rotas praticadas

O resultado das rotas praticadas pode ser visto facilmente na tabela Excel copiada da tabela do modelo. Neste caso, basta que indiquemos quantas vezes uma ligação será usada (coluna soma das partes), que a tabela calcula o custo do percurso, e indica a sua viabilidade através do fluxo nos nós. Ao final indica também o número de nós inviáveis, se for o caso (figura 6).

Modelagem usando LINGO

No sistema LINGO, o modelo contém uma definição de leitura de dados de conjuntos, variáveis e parâmetros de custos, e um processo de modelagem algébrica, como pode ser visto na figura 7. Os dados podem ser extraídos diretamente de uma planilha, através de macros que chamam o LINGO. O modelo retorna o valor das variáveis, função objetivo e o valor das restrições, assim como os tempos de execução e limites inferiores e superiores atingidos para a instância. Por simplicidade, mostramos um exemplo sobre a mesma instância usada nas indicações acima.

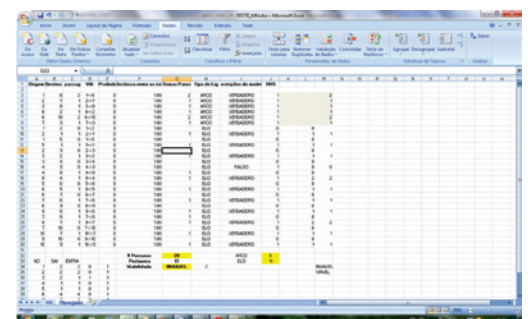


Figura 6 - Usando a planilha do modelo Excel para verificar a solução praticada

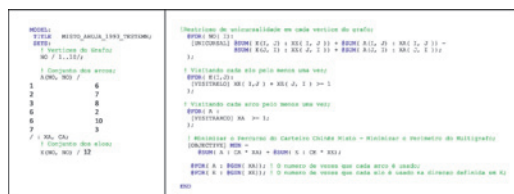


Figura 7 - Modelo algébrico de Kappauf & Koehler (1979) usando LINGO

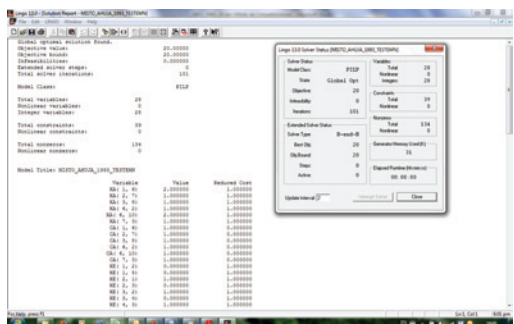


Figura 8 - Solução do modelo algébrico de Kappauf & Koehler (1979) usando LINGO

RESULTADOS

Na tabela 1 temos inicialmente a descrição das 12 instâncias usadas para avaliar as rotas das áreas de coleta de lixo da região do Jardim Europa, São Paulo. As instâncias são descritas considerando o número de passagens pelas ligações, indicadas nas plantas de cada área da prefeitura. Nosso trabalho aqui foi identificar quantas vezes em cada segmento de rua, passa o veículo no respectivo sentido, conforme o que se indica no percurso das plantas. Como em todas elas, o início e o fim de rota acontecem em locais distintos, o número de inviabilidades deve ser maior que 2 para que se considere inviável o trajeto realizado.

Os testes foram feitos usando o computador com as seguintes características: Core 2 Duo Intel T5550 1.83GHz, 3Gb RAM, Windows 7, 32 bits.

A tabela 1 contém na coluna GRAFO os nomes de cada instância. Nas colunas V, E e A temos o número de vértices, elos e arcos da rede respectivamente; na coluna Perim temos o perímetro provável da rede (soma das distâncias das ligações); na coluna Viab temos a viabilidade da solução da rede; na coluna Nós Inv temos a indicação do número de nós inviáveis no percurso descrito pelos planos da prefeitura; e na coluna Perc temos o comprimento provável do percurso indicado pelos planos da prefeitura. As instâncias e as planilhas aqui referenciadas podem ser encontradas em (www.graphvhs.com.br/xnes).

Claramente pode-se notar que vários percursos estão com perímetros maiores, indicando que há muitas ligações não per-

corridas no grafo. Estas ligações deveriam ser obrigatoriamente percorridas, pelas necessidades da região a que pertencem.

A tabela 2 descreve o comportamento dos modelos no que se refere a aplicação do modelo de Kappauf & Koehler (1979) no software LINGO, e do método B&B proposto por Negreiros et al (2010) implementado no software Xnês. São 15 as instâncias avaliadas, sendo três de teste, Teste_AR, Teste_MN e BH, e 12 as instâncias (PI) provenientes da coleta de lixo de São Paulo.

Há 11 instâncias com uma quantidade razoável de vértices (>90) e quatro com poucos vértices (<70). Os três conjuntos, vértices, arcos e elos indicam o número de restrições do modelo, enquanto que o dobro do número de elos e o número de arcos indicam a quantidade de variáveis inteiras do problema.

Na tabela 2, as quatro primeiras colunas (GRAFO, V, E, A) são as mesmas da tabela 1. As colunas 5 a 7 indicam para o Xnês, \$ - distância total percorrida (gap% em relação ao limite inferior da solução heurística - gap% em relação ao limite inferior da solução final), t - tempo de processamento em segundos, Otim - se a solução foi provada ser ótima ou apenas viável. Já as colunas de 8 a 10 indicam para o LINGO, \$ - distância total percorrida (o número de iterações do método B&B sobre o modelo usado), t - tempo de processamento em segundos, Otim - se a solução foi provada ser ótima ou se retorna uma solução viável.

Por fim, a tabela 3 mostra uma relação entre as soluções planejadas pela prefeitura, todas inviáveis (tabela 2) e a solução ótima das instâncias que tiveram os seus custos acima do perímetro da malha construída. Neste caso, somente estas instâncias tiveram todas as ligações percorridas em ambas as soluções. Apenas duas instâncias obtiveram resultados que podem ser comparáveis. São elas: PI10 e PI22. Nota-se que PI10 está a 16,65% do ótimo e a PI22 está a 6,10% do ótimo.

Resultados do Excel
Foi utilizada a

versão Excel Office 2007, onde o “solver” contém um algoritmo de programação matemática geral (linear e não linear) baseado no método do gradiente conjugado ou no método de Newton - e oportunamente no Simplex na versão linear, à escolha. Não há, no “solver”, a limitação das variáveis a valores inteiros.

Apesar de não aparecer na tabela 2, usamos todos os métodos sem sucesso sobre as instâncias PI, porém obtivemos resultado apenas para uma delas. O erro obtido na maioria delas era com relação ao número de células ajustáveis, ou seja, limites de variáveis excedidos. Algumas outras o modelo encontrava uma solução inviável, e mesmo que indicássemos a continuidade de resolução, o Excel continuava sem resolvê-las. Por fim, o Excel somente resolveu a instância trivial TESTE.

Resultados do LINGO

Usamos a versão 13.0 do LINGO, com número ilimitado de restrições e variáveis de qualquer natureza (linear, inteira, binária). Foi descrito o modelo de programação inteira da unicursalidade, conforme já mostrado na seção “Modelagem usando LINGO”. O “solver” do LINGO resolveu e provou a otimalidade de todas as instâncias PI e duas das de teste, ficando apenas a instância BH sem a descrição da solução viável no resultado final. Esta instância foi colocada propositalmente, pois necessitávamos curiosamente conhecer a solução ótima da instância.

A instância PI09 foi a que mais demorou de ser resolvida, entre as PIs, necessitando 15s para ser concluída. Aqui fica claro que o número de elos em um grafo misto é importante no tratamento do problema através do modelo de Kappauf & Koehler (1979), mesmo assim, o LINGO provou a otimalidade da solução para esta instância.

Na instância BH, o LINGO retornou uma solução com gap=1,71% entre LS=47592 e LI=46776, em mais de 2 milhões de iterações do método B&B. A solução viável não pode ser reportada

Tabela 1
Plano da Prefeitura de São Paulo

GRAFO	V	E	A	Perim	Viab	Nós Inv	Perc
PI01	189	29	203	19564	inv	9	29510
PI02	190	20	210	16121	inv	15	22484
PI03	132	14	160	12355	inv	24	15385
PI04	91	46	106	16352	inv	12	12593
PI05	183	64	169	16076	inv	16	18949
PI06	131	74	113	28880	inv	21	37726
PI07	57	4	87	11117	inv	6	16828
PI08	52	20	58	7282	inv	14	13943
PI09	34	48	4	8473	inv	8	10480
PI10	74	15	93	14120	inv	9	25233
PI22	99	87	55	13780	inv	9	19725
PI25	218	121	149	6677	inv	5	11365

Tabela 2
Resolução de Modelo via Xnês e LINGO

GRAFO	V	E	A	XNES			LINGO			Praticado	
				\$	t	Otim	\$	t	Otim	\$	
PI01	189	29	203	35218 (1.02-0.03)	7.379	Ok	35218 (149)	0	Ok	29510 (Inviável)	
PI02	190	20	210	24571 (1.61-0.14)	5.627	Ok	24571 (77)	0	Ok	22424 (Inviável)	
PI03	132	14	160	18486 (1.57-0.54)	3.546	Ok	19486 (118)	0	Ok	15385 (Inviável)	
PI04	91	23	106	29030 (2.38-0.02)	4.652	Ok	29030 (142)	0	Ok	22593 (Inviável)	
PI05	183	64	169	22733 (6.37-0.31)	301.73	viável	22496 (439)	0	Ok	18949 (Inviável)	
PI06	131	74	113	45132 (5.37-0.23)	301.74	viável	45014 (1010)	0	Ok	28880 (Inviável)	
PI07	57	4	87	17364 (0.99-0.39)	0.905	Ok	17364 (57)	0	Ok	16828 (Inviável)	
PI08	52	20	58	9532 (3.36-0.12)	2.436	Ok	9532 (289)	0	Ok	13943 (Inviável)	
PI09	34	48	4	11393 (15.81-0.05)	303.442	viável	11103 (143631)	15	Ok	10480 (Inviável)	
PI10	74	15	93	21631 (2.71-0.02)	4.105	Ok	21631 (181)	0	Ok	25233 (Inviável)	
PI22	99	87	55	18641 (7.86-0.29)	301.87	viável	18591 (9778)	2	ok	19725 (Inviável)	
PI25	218	121	149	28155 (7.43-0.13)	301.94	viável	28281 (9327)	1	ok	21365 (Inviável)	
Teste	5	4	2	570 (0.0-0.0)	1.698	Ok	570 (1)	0	Ok	570 (ótimo)	
Teste_MN	10	11	6	20 (17.65-5.26)	0.743	Ok	20 (101)	0	ok	20 (ótimo)	
BH	283	267	185	48196 (9.94-0.5)	947.23	viável	47592 (2M)	945	viável	-	

pelo LINGO, que abortou a execução após 15m45s estando com mais de 20 000 nós do B&B ainda abertos na memória.

Mesmo assim, em todos os casos analisados, o LINGO venceu o Xnês em tempo computacional, e na obtenção das soluções do PCC misto das instâncias PI.

Xnês

Usou-se a versão 2.01 do Xnês, onde o método B&B implementado para o PCC misto demonstrou robustez em todos os casos avaliados. Porém revelou a sua dificuldade no tratamento de instâncias com muitos elos na rede, em relação ao número de arcos (PI09, PI22, PI25 e BH).

Apesar de que, em muitos casos, no tempo limite de 300s não tenha retornado a solução ótima, a diferença para o ótimo, provado pelo LINGO, é muito pequena, todas abaixo de 0,2%. Além disto, todos os casos, até mesmo a instância BH, o Xnês exibiu a solução final encontrada, provando sua grande vantagem operacional, em relação aos demais, que é a obtenção e visualização das soluções viáveis correntes encontradas no tempo máximo escolhido pelo usuário.

Praticado

Em todas as instâncias PI, a solução apresentada nos planos pela empresa

Tabela 3
Praticado X Ótimo
(Acima do Perímetro)

GRAFO	Perim	Praticado	Ótimo	Ótimo
PI01	19564	29510	35218	-
PI02	16121	22484	24571	-
PI03	12355	15385	19486	-
PI05	16076	18949	22496	-
PI06	28880	37726	45014	-
PI07	11117	16828	17364	-
PI08	7282	13943	9532	-
PI09	8473	10480	11103	-
PI10	14120	25233	21631	16.65
PI22	13780	19725	18591	6.10
PI25	6677	11365	28281	-

LOGA à prefeitura de São Paulo está inviável, ou seja, em nenhuma delas há um circuito/caminho euleriano que possa ser executável em campo. Os roteiros planejados e entregues à prefeitura estão, pois, errados para serem executados em uma única viagem, para um veículo da coleta de lixo domiciliar.

ADEQUAÇÃO DO MODELO DE ROTAS À REALIDADE DA COLETA

Enquanto a equipe do Xnês cuidava das análises de percurso das PIs, em São Paulo, Rigonatti enfrentava em campo a verificação da situação de coleta de lixo em duas delas: PI04 e PI08. Sua missão era tirar as dúvidas da equipe sobre o cumprimento da coleta, pois pareciam estranhos os resultados preliminares dos roteiros, ou seja: a equipe não compreendia a viabilidade dos trajetos, e tampouco se um único caminhão em uma única viagem conseguiria finalizá-la em um dia.

Acompanhamento dos Roteiros

Para acompanhar os roteiros, Rigonatti equipou-se de câmera filmadora e acompanhou, sozinho e de longe, usando bicicleta, os trajetos realizados pelos caminhões na PI04. Iniciou o acompanhamento às 19h32 do dia 16/04/2012 (segunda-feira) e concluiu o trabalho às 3h59 da manhã do dia seguinte. Acompanhou passo a passo o desenvolvimento do trabalho pelos coletores e reportou algumas das situações abaixo.

- 1) Houve várias manobras proibidas. Por exemplo: caminhão entrou de ré em rua de mão única, entrou de ré em metade de quarteirão, entre outras.
- 2) Várias ruas não foram cobertas.
- 3) Ruas onde o caminhão para na esquina e não procede a entrada por ser estreita ou ser de difícil manobra de retorno (pontos

especiais de coleta).

4) O final de um trajeto corresponde ao início do próximo (o motorista segue o esquema da prefeitura).

5) Realizada a coleta em lados diferentes de uma mesma rua, não indicados no mapa da prefeitura.

O percurso total na PI04 acompanhado nas quatro viagens do caminhão somente dentro da área de coleta foi de 19 871m (não incluindo as

viagens ao aterro). Em média cada viagem foi de 11-12t, sendo usado um compactador com dois eixos de 12t com uma tripulação de 3 coletores e o motorista. O caminhão partiu da base de Jaguaré e fez os despejos na estação de transbordo da Rua Altamira. Um esboço desta cobertura pode ser visto na figura 9, onde se vê à direita a PI04 na cidade, e à esquerda cada viagem de coleta em diferentes cores.

No dia 25/04/2012 (sexta-feira), foi novamente acompanhar a coleta. Porém acompanhou o caminhão errado, e perdeu a coleta deste dia. Perdeu também uma câmera. Apesar disto, ele conseguiu tirar a dúvida sobre qual o caminhão que faz a coleta na área, pois achávamos que seriam dois. Mas, de fato, confirmou-se ser só um: o mesmo do dia 16/04/2012.

O percurso total na PI08 acompanhado nas quatro viagens do caminhão somente dentro da área de coleta, foi de 24 980m (não incluindo as viagens ao aterro). Em média cada viagem foi de 11-12 toneladas, sendo usado um caminhão compactador com dois eixos de 12 toneladas e uma tripulação de três coletores e o motorista. O caminhão partiu da base de Jaguaré e fez os despejos na estação de transferência da Rua Altamira. Ao final, os coletores seguem para a base no Jaguaré, o caminhão descarrega na estação da Rua Altamira e retorna à base. Desta vez tomou-se o cuidado de entrevistar um coletor para entender melhor a coleta, e se obteve as respostas abaixo.

- 1) A coleta é feita todos os dias, menos aos domingos. Feriados só os principais: Natal, Ano Novo e Dia do Trabalho.
- 2) O número de viagens varia de um a quatro na PI08. Há dias muito leves e muitos carregados, segunda-feira é o pior dia.
- 3) Atropelamento, cortes, ferimentos e chuva são as maiores dificuldades enfrentadas pelos coletores.



Figura 9 - Cobertura dos trajetos acompanhados da PI04

4) Mesmo com chuva a coleta não para. A empresa fornece capas de chuva, mas os coletores não usam porque segundo o entrevistado, “a capa não deixa a pele respirar”, de forma que eles ficam muito quentes sob a capa e então quando tiram a capa, pegam pneumonia. Com chuva, todos preferem coletar sem capa. Tendo sido dito com grande naturalidade.

5) Há consumo de bebidas alcoólicas enquanto se espera o caminhão descarregar – isto acontece em geral nos dias frios.

6) O final de um trajeto não corresponde ao início do próximo (o motorista não segue o esquema da prefeitura).

7) Eles conhecem bem o trajeto que fazem, e não necessitam de auxílio de mapas para cumprir a sua tarefa.

8) Dois lados de rua são feitos e não reportados no mapa da prefeitura.

Um esboço desta cobertura pode ser visto na figura 10, onde se vê a direita a área e à esquerda cada viagem de coleta em diferentes cores.

Solução para a Coleta de São Paulo

Negreiros & Palhano (2011ab) indicam a melhor maneira de proceder com o processo de coleta de lixo, quando a situação tem muita variabilidade como a que se aplica em São Paulo. Eles mostraram que usando um roteirizador especializado na coleta de lixo (SisRot Lix) desenvolvido pela empresa GRAPHVS Ltda., minimiza-se além do custo dos trajetos, as manobras difíceis. No roteirizador, esquemas de rotas baseadas em processos de roteirizar primeiro e agrupar depois, roteirizar-agrupar-roteirizar, ou agrupar e roteirizar

produzem diferentes soluções que podem distanciar em até 20% do menor custo possível para realizá-las.

A seleção da melhor estratégia depende obviamente da rede viária, da topologia da cidade e da produção diária de lixo da região em análise. A maneira mais adequada de se planejar os percursos é de fato analisando rotas área a área. Sabendo-se que serão até quatro viagens diárias, planos para uma, duas, três e quatro viagens devem ser produzidos de modo a minimizar o custo global do processo de coleta. Caso se tenha o controle de cada área já bem definido e dimensionado, deve-se redimensionar toda a região usando processos de destritamento, para minimizar a frota e/ou o número de viagens do processo.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou dois estudos importantes: adequação de modelos do PCC misto à realidade e a coleta de lixo no Jardim Europa.

No primeiro estudo, a aplicação do problema do carteiro chinês misto foi considerada, para dimensionar áreas de coleta de lixo na cidade de São Paulo. Neste caso, todos os percursos analisados estavam inviáveis, ou seja, não tinham conexão com a realidade de um circuito euleriano possível de ser feito. Os modelos usados para calcular as rotas ótimas do PCC misto tiveram amplo sucesso nas 12 áreas testadas. A versão do modelo de Kappauf & Koehler (1979) encontrou a solução ótima em todos os casos das PIs executadas no software LINGO. Já no Xnês, cinco das 12 instâncias não foram resolvidas na otimalidade. Porém as que não foram resolvidas estavam a menos de 0,2% do ótimo. No EXCEL não foi possível encontrar soluções para as instâncias PIs selecionadas, mostrando que o “solver” não se ajusta ao modelo.

No segundo estudo, que corria em paralelo com o primeiro, procurou-se entender a coleta de lixo de São Paulo na região do Jardim Europa. Acompa-

nhou-se passo a passo a tarefa de coleta de lixo em duas PIs, com relativo sucesso na primeira e total êxito na segunda. Como resultado pode-se entender as dificuldades da coleta e equacionar as formas possíveis de se fazer melhores roteiros para a coleta de lixo, a partir de planejamentos usando roteirizadores adequados, que consideram todos os aspectos encontrados no campo (pontos especiais de coleta, manobras econômicas, redistribuição de carga de lixo).

* **Alexandre Rigonatti** – Engenharia e tecnologia - Engenheiro de Produção
E-mail: a_rigonatti@hotmail.com

** **João Amílcar Viana Rodrigues, Pablo Luis Fernandes Batista, Marcos José Negreiros Gomes** – Universidade Estadual do Ceará (UECE), Mestrado Profissional em Computação Aplicada (MPCOMP-UECE-IFCE), Curso de Bacharelado em Ciências da Computação (CBCC)
E-mails: joaoamilcar@gmail.com - negreiros@graphvs.com.br - opablofernandes@hotmail.com

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRELPE (2012), <http://www.abrelpe.org.br>, Associação Brasileira de Empresas de Resíduos Sólidos (2012).
- [2] AHUJA, R.K.; MAGNANTI, T.L.; ORLIN, J.B. - Network Flows - Theory, Algorithms and Applications, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1993.
- [3] EILSELT, H.A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. (1995) - Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem. Operations Research, vol. 43(2) pgs. 231-242
- [4] FORD, L.R.; FULKERSON, D.R. - Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962.
- [5] GOOGLE MAPS - <http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=wl>.
- [6] GRAPHVS - Graphvs Cons. Com. Et Rep. Ltda. (www.graphvs.com.br/Xnes), 2012.
- [7] IBAM (2001) - Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Secretaria Especial do Desenvolvimento Urbano (SEDU), Governo Federal.
- [8] IBGE (2012) - <http://www.ibge.gov.br>, Censos 2000 e 2010.
- [9] KAPPAUF, C.H.; KOEHLER (1979) - The mixed postman problem. Discrete Applied Mathematics 1, 89-103.
- [10] LINDO SYSTEMS - www.lindo.com (2012).
- [11] NEGREIROS GOMES, M. J.; COELHO, W.R.; PALHANO, A.W.C.; COUTINHO, E.F.; CASTRO, G.A.; NEGREIROS, F.J.; BARCELLOS, G.C.; RESENDE, B.F.; PEREIRA, L.W.L. (2009) - O Problema do Carteiro Chinês, Algoritmos Exatos e um Ambiente MVI para Análise de suas Instâncias: Sistema Xnês. Pesquisa Operacional, v.29, n.2, 323-363.
- [12] NEGREIROS GOMES, M.J.; PALHANO, A.W.C. - (2011a) - Strategies for design routes to urban garbage collection. Optimisation Days'2011, HEC-Montreal.
- [13] NEGREIROS GOMES, M. J.; PALHANO, A.W.C. - (2011b) - Line graph transformations to the Euler tour with movement prohibition Problem. Annals of IFORS'2011, Melbourne-Austrália.
- [14] NOBERT, Y.; PICARD, J.-C. (1996) - An optimal algorithm for the Mixed Chinese Postman Problem. Networks 27, 95-108
- [15] RIGONATTI, A.; SOUZA, L. D. - Otimização de Rotas em Caminhões de Coleta de Lixo Urbano. TCC Eng de Produção, Universidade Anhembi Morumbi, p. 45. (2011).
- [16] SHERAFAT H. - (1988) - Uma Solução para o Problema do Carteiro Chinês Misto, Anais do IV CLAIO - XXI SBPO, pgs. 157-170, Rio de Janeiro.

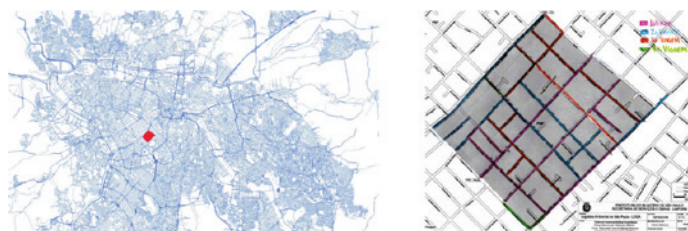


Figura 10 - Cobertura dos trajetos acompanhados da PI08