

Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Planejamento e Distribuição da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos

Eugênio de Oliveira Simonetto^{1,2}, Denis Borenstein²

¹Curso de Sistemas de Informação – Centro Universitário Franciscano (UNIFRA)
Andradas, 1614 – 97015-032 – Santa Maria – RS – Brasil

²Escola de Administração – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Rua Washington Luiz, 855 - 90010-460 – Porto Alegre-RS-Brasil

eosimonetto@unifra.br , denisb@ea.ufrgs.br

Resumo. O artigo apresenta um sistema de apoio à decisão aplicado ao planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos (SCOLDSS), o qual tem por funcionalidade principal a geração de alternativas ao processo decisório no que se refere à: (a) alocação de veículos para a coleta seletiva, bem como o roteiro a ser percorrido pelos mesmos e, (b) a determinação da quantidade diária de resíduos sólidos a ser enviado a cada unidade de triagem. Para o desenvolvimento do mesmo foi utilizada a combinação de técnicas advindas da Pesquisa Operacional, que são a simulação computacional de eventos discretos e algoritmos para o problema da alocação e roteamento de veículos. O sistema foi desenvolvido utilizando o ambiente Borland Delphi e, para a simulação foi utilizado o simulador Arena 3.5. Para a validação do SCOLDSS estão sendo utilizados dados da coleta seletiva de um município do Rio Grande do Sul.

Abstract. The paper presents a decision support system (DSS) for recyclable waste collection planning. The computer system has the following objectives: (a) to define the vehicles' allocation and routing; (b) to determine the quantity of solid waste to be sent to each waste recyclable trial unit; and (c) to generate operational scenarios to be taken into account in the decision process. To accomplish such objectives the decision support system employs two well-known operations research techniques, namely simulation, and assignment/VRP algorithms. The DSS was implemented in Borland Delphi, using the commercial package Arena 3.5 to carry out the simulations. The system was validated using a field test in one city of Rio Grande do Sul.

1. Introdução

A reciclagem dos resíduos sólidos é uma excelente alternativa para propiciar a preservação de recursos naturais, a economia de energia, redução do material que demanda o aterro sanitário, geração de emprego e renda, conscientização da população para questões ambientais. Porém, para um melhor funcionamento é de vital importância que se implante nas cidades um amplo sistema de coleta seletiva, onde os recicláveis e reutilizáveis sejam separados nas residências e coletados pelo sistema municipal de coleta seletiva. Apesar de ser uma excelente alternativa para a redução de resíduos com

destino aos aterros, apenas 4% dos resíduos são reutilizados ou reciclados nas cidades gaúchas, segundo o CEMPRE (ONG-Compromisso Empresarial para a Reciclagem). Um dos motivos desta parcela reduzida de reciclagem deve-se ao mau acondicionamento dos resíduos pela população, fato este gerado pela falta de informação acerca da coleta seletiva. Outros fatores que contribuem para o pequeno índice de reciclagem dos resíduos é o alto custo da coleta seletiva para as municipalidades (O'Leary, 1999; Monteiro, 2001) e a falta de um projeto para dimensionar de forma adequada à capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem.

Além do alto custo da coleta, um fator que contribui bastante para os baixos índices de reciclagem é a falta de atenção dada à capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem. Muitas vezes, os sistemas de coleta consideram, para a definição da distribuição dos resíduos, somente as distâncias ou os custos de deslocamentos dos pontos de coleta aos depósitos finais (Chang, 2000; Huang, 1998). Tais modelos, devido às características das disposições finais estudadas pelos mesmos, não levam em consideração o fluxo dinâmico de resíduos (entrada / saída) que possuem as unidades de triagem de resíduos recicláveis.

Com o desenvolvimento do SCOLDSS, pretende-se auxiliar o planejamento e distribuição da coleta seletiva de resíduos sólidos, buscando a redução das distâncias percorridas pelos veículos de coleta e, também, a redução da quantidade de resíduos desperdiçados devido à falta de controle na capacidade de processamento de trabalho nas unidades de triagem. Observa-se na literatura sobre gestão de resíduos que as disposições finais consideradas pelos mesmos são geralmente ou o aterro sanitário, ou os incineradores, havendo uma desconsideração das unidades de triagem. O único artigo a tratar da disposição final de resíduos potencialmente recicláveis (Huang, 1998), o faz de maneira similar ao tratamento dado aos aterros sanitários, desconsiderando o fluxo dinâmico de entrada e saída de resíduos, característica das unidades de triagem de resíduos sólidos.

Para o desenvolvimento do sistema computacional apresentado no artigo foram utilizadas técnicas quantitativas oriundas da Pesquisa Operacional, tais como a simulação discreta e algoritmos para a resolução do roteamento de veículos. O uso destas técnicas, objetiva agregar qualidade ao processo decisório, pois muitas das vezes, as decisões sobre o planejamento da gestão dos resíduos sólidos são tomadas baseadas somente na experiência dos gestores (Chang, 1996). Fato este, que segundo este autor, contribui para o alto custo e o baixo desempenho dos sistemas de coleta de resíduos nas cidades. A utilização de ferramentas de Pesquisa Operacional (PO) na Gestão de Resíduos Sólidos surge como uma alternativa viável para o tratamento da complexidade inerente ao processo de coleta seletiva de resíduos sólidos, pois através do uso destas ferramentas pode-se representar uma situação do mundo real, estudar seu comportamento (via execução de modelos formais) e tomar decisões com base nas conclusões extraídas. Vários autores (Huang, 1998; Chang, 2000; Chung, 1996) já utilizaram técnicas e métodos da PO para desenvolver estudos na área de coleta de resíduos sólidos.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é descrito o sistema de apoio à decisão – SCOLDSS, enfatizando-se a concepção da sua arquitetura. Na seção 3 são apresentados dados relativos à primeira etapa de validação do sistema e, por fim, na seção 4 são apresentadas as considerações finais do artigo.

2. SCOLDSS - O Sistema de Apoio à Decisão Proposto

O sistema de apoio à decisão SCOLDSS foi construído baseado nas pesquisas bibliográficas e observações *in loco* do processo de coleta e distribuição dos resíduos sólidos provenientes da coleta seletiva. Com o desenvolvimento e implementação deste sistema busca-se subsidiar o processo de tomada de decisões operacionais dos gestores da área de resíduos sólidos (Goldberg, 2000) no que se refere à logística dos resíduos sólidos, desde a fase de coleta até a fase de entrega dos resíduos, nas unidades de triagem. Basicamente, o sistema contribuirá através da geração e análise de possíveis cenários de operação deste tipo de coleta. Considera-se no estudo desenvolvido que as etapas para implantação da coleta seletiva (equipamentos, recursos humanos, áreas e periodicidade da coleta seletiva) já estejam devidamente definidas.

A metodologia para o desenvolvimento do SCOLDSS foi a mesma adotada para o desenvolvimento de modelos em Pesquisa Operacional (Law, 1991). O desenvolvimento foi estruturado da seguinte forma: (1) estudos exploratórios, na qual o problema foi identificado e estruturado; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando-se a tecnologia de sistemas de apoio à decisão; (4) validação da solução, através de testes em laboratório e em campo, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada. A validação foi desenvolvida com a utilização de dados históricos da área de resíduos sólidos recicláveis de um município do Rio Grande do Sul e, através da participação de pesquisadores na área.

Para o desenvolvimento do SCOLDSS foi utilizada a arquitetura de sistemas de apoio à decisão proposta por Sprague (1991), a qual é composta por três subsistemas básicos: banco de dados, modelo decisório e interface, os quais serão apresentados nas próximas subseções. A arquitetura do SCOLDSS é apresentada na figura 1.

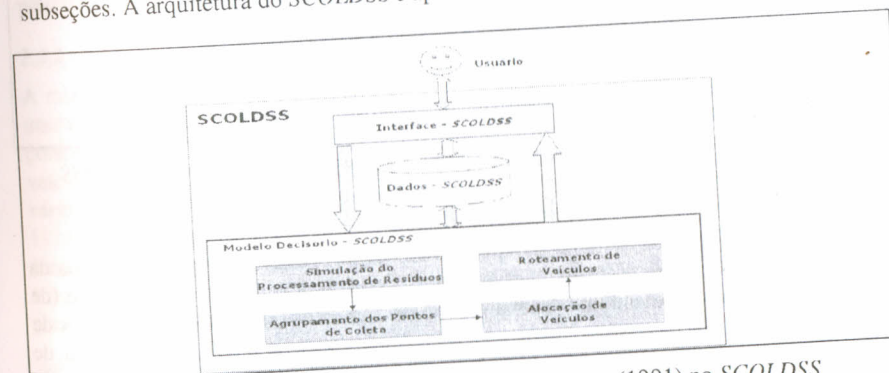


Figura 1 – Representação da arquitetura de Sprague (1991) no SCOLDSS

2.1 - Subsistema banco de dados

A premissa básica para a construção do subsistema banco de dados do SCOLDSS foi a de selecionar dados, os quais fossem de vital importância à geração de informações para os gestores, bem como para o subsistema modelo, o qual trabalhará, basicamente, utilizando os dados deste subsistema. Para o desenvolvimento do banco de dados foram

utilizados: trabalhos realizados anteriormente a este estudo (Huang 1998, Chung, 1996, Chang, 2000), manuais técnicos relativos à área de Gestão de Resíduos Sólidos (O'Leary, 1999; Monteiro, 2001), bem como de entrevistas para levantamento de requisitos junto à especialistas em gestão de resíduos sólidos. Esta estrutura também foi utilizada como base de dados para o desenvolvimento do Sistema de Informação para a Coleta Seletiva de Resíduos (SICOLSE) (Simonetto, 2003). O diagrama entidade-relacionamento do subsistema banco de dados do SCOLDSS pode ser visualizado na figura 2.

2.2 - Subsistema Modelo Decisório

O subsistema modelo do SCOLDSS foi concebido utilizando-se duas técnicas distintas da Pesquisa Operacional: a simulação computacional de eventos discretos e o desenvolvimento de heurísticas para o problema do roteamento de veículos. A utilização destas duas técnicas é justificada pela natureza distinta dos problemas tratados, primeiro, a determinação da capacidade de processamento de resíduos e, segundo, a determinação do escoamento do fluxo de resíduos, em consequência, do resultado das simulações. Baseado na integração da simulação do processamento de resíduos nas unidades de triagem, para a determinação da capacidade de processamento de resíduos em um dia e, a execução do problema do roteamento de veículos com múltiplos depósitos, serão determinados os percursos dos veículos de coleta de resíduos, bem como o destino final dos resíduos por eles transportados.

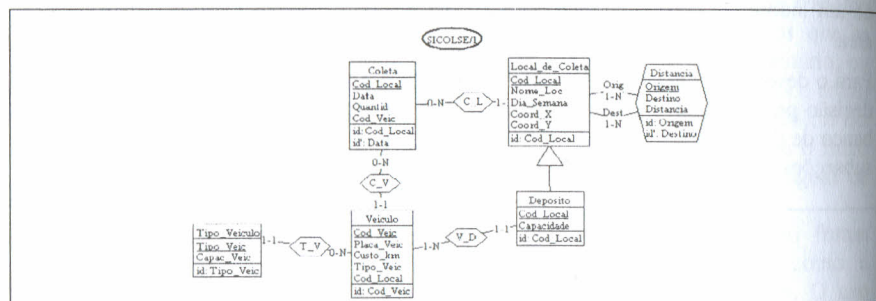


Figura 2– Diagrama entidade-relacionamento do modelo de dados do SCOLDSS

2.2.1 - A Simulação de Eventos Discretos no SCOLDSS

Quando da utilização do sistema de apoio à decisão, o usuário irá informar: o dia da semana para o qual será efetuado o planejamento da coleta seletiva, o mês do ano (de forma a considerar as eventuais sazonalidades existentes no processo); as unidades de triagem de resíduos operantes, para que seja determinada a quantidade máxima de matéria prima pós-consumo (em kg), que cada unidade em operação, é capaz de processar diariamente.

Nesta primeira etapa de utilização do modelo decisório executa-se um modelo de simulação computacional de eventos discretos, implementada no simulador *Arena 3.5*, para a determinação da capacidade de processamento de resíduos em cada unidade de triagem. Tal determinação faz-se necessária pela particularidade encontrada no caso de resíduos potencialmente recicláveis originada pelo fluxo de entrada e saída deste tipo de resíduo nas unidades de triagem. Ambos os fluxos não são verificados em se tratando

dos resíduos sólidos que são direcionados ao aterro sanitário, pois neste tipo de disposição final, não existe a saída dos resíduos sólidos (somente a entrada de resíduos) (Chang, 2000; Huang, 1998; DMLU, 2004).

Nesta última etapa, tanto os resíduos selecionados para retornarem ao mercado, como os que terão como destino o aterro sanitário, têm de serem levados em consideração pela simulação, pois ambos ocupam espaço físico temporariamente e, também, consumiram um determinado tempo para serem processados pelos trabalhadores. Para simular a quantidade máxima de resíduos a ser processada diariamente em cada unidade de triagem é levada em consideração a média total coletada diariamente de resíduo sólido potencialmente reciclável, de acordo com o dia da semana e o mês do ano e, a capacidade de processamento em quilograma por minuto de trabalho em cada unidade. Para tanto, considera-se também no modelo de simulação eventuais interrupções no trabalho (almoço, troca de equipe de trabalho) e a variação da produção de um turno para outro.

Para a distribuição dos resíduos sólidos durante a simulação foi utilizado o componente *Pickstation* do simulador *Arena 3.5*, o qual seleciona a unidade para enviar-se a matéria-prima, em ordem de precedência, de acordo com: o número de recursos utilizados (de modo a evitar ociosidade) e, pela quantidade de matéria-prima pós-consumo aguardando para ser processada. A informação gerada pela primeira fase do modelo decisório é a demanda de resíduos sólidos (em kg) que cada unidade de triagem é capaz de processar em um determinado dia de trabalho, obtida pela média das n execuções da simulação. A capacidade de processamento de resíduos em cada unidade de triagem é integrada ao modelo decisório na forma de restrição de capacidade ao problema do roteamento de veículos com vários depósitos e frota heterogênea. A restrição garante que nenhuma unidade de triagem receba uma quantidade de resíduos maior que a sua capacidade de processamento simulada.

2.2.2 - Agrupamento de Pontos de Coleta e Alocação de Veículos

A fase subsequente da utilização do modelo decisório caracteriza-se por possuímos n unidades de triagem (com a demanda já definida pela primeira fase do modelo) e m pontos de coleta com oferta de resíduo sólido reciclável a serem coletados pelos veículos. Tal descrição denota claramente o problema do roteamento de veículos com vários depósitos, onde, para a resolução, foi utilizada a abordagem proposta por (Gillet, 1974), implementadas na forma de heurísticas do tipo “agrupar para depois rotear”. Nesta abordagem, primeiramente devem-se associar pontos de coleta às unidades de triagem específicas. Ou seja, é executada uma determinação do tipo “os resíduos do ponto de coleta x serão enviados para a unidade de triagem y ”.

Após o procedimento de agrupamento dos pontos de coleta, é efetuada a rotina de alocação dos veículos para a coleta seletiva. Para o desenvolvimento da alocação foi implementado no SCOLDSS o algoritmo *simplex* (Goldberg, 2000), de uma forma que não se considerasse no modelo decisório cada veículo individualmente, pois assim sua resolução poderia comprometer no aspecto tempo de resposta o desempenho do sistema como um todo. Para a resolução da alocação foram considerados os tipos de veículos, ou seja, os diversos veículos da frota foram classificados conforme as suas capacidades de carga. Com isto, consegue-se um processamento mais rápido do modelo, evitando possíveis explosões combinatórias no espaço de soluções.

Como resultado final do processamento desta etapa tem-se estipulada a quantidade em quilogramas que um determinado tipo de veículo k irá transportar para uma unidade de triagem i . Porém, se a resolução envolver vários tipos distintos de veículos é necessário utilizar abordagens avançadas (metaheurísticas) para a resolução da alocação, tais como, a busca-tabu, algoritmos genéticos ou *simulated annealing*, pois o algoritmo *simplex* comporta-se bem somente em problemas de pequeno e médio espectro (Cordeau, 2002).

2.2.3 - Determinação do Roteiro da Coleta Seletiva

Após a estimativa da quantidade máxima de processamento de resíduos por unidade; a determinação do envio do resíduo coletado em cada ponto para uma unidade de triagem específica; da estipulação da quantidade de resíduo mínimo a chegar em cada unidade de triagem; e dos veículos alocados para execução da coleta, reduz-se o problema à configuração do problema de roteamento de veículos com um único depósito (Cordeau, 2002). Como cada depósito (unidade de triagem) já possui uma determinação de quais os pontos de coleta lhe enviarão material para processamento, é necessário somente estabelecer a ordem que cada ponto de coleta será visitado. Para se garantir bons resultados nesta etapa, optou-se por utilizar o algoritmo para roteamento de veículos proposto por Renaud (2002), o qual é aplicado a problemas com frota heterogênea de veículos e apresenta excelentes resultados com problemas reais de roteamento. Para a determinação da oferta de resíduo em cada ponto de coleta, a qual é uma das restrições componentes do problema de roteamento de veículos, é utilizada a média de coleta (em kg) no ponto de coleta. A quantidade média é estimada conforme o dia e o mês de coleta.

Nesta etapa, o objetivo é a geração das rotas de coleta a serem percorridas, bem como as atribuições de qual veículo deve percorrer cada rota. Após o processamento das rotinas é gerada uma resposta com a seguinte estrutura: para a unidade de triagem x , o veículo n irá percorrer as pontos de coleta a , b e c (nesta ordem). No SCOLDSS, o resultado é apresentado na forma de rotas em um relatório gráfico com mapa ilustrativo dos locais a serem percorridos, de modo a facilitar a comunicação com os usuários.

2.3 - Subsistema Interface

Para o desenvolvimento do subsistema interface do SCOLDSS foi levada em consideração a amigabilidade (*user-friendly*) da mesma para com os possíveis usuários finais, os gestores da área de resíduos sólidos, os quais não possuem a obrigação de serem especialistas na área computacional. Exemplo da interface principal do SCOLDSS pode ser visualizado na figura 3. A validação da interface foi desenvolvida com a participação de possíveis usuários (gestores e acadêmicos) do SCOLDSS.

3. Validação do SCOLDSS

O sistema SCOLDSS consiste do desenvolvimento de modelos quantitativos e de simulação para o planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos. Como um modelo pode ser definido como "representação do mundo real" (Goldberg, 2000) temos que fazer com que o comportamento da representação seja o mesmo (ou mais próximo possível) da realidade em questão, sob determinadas condições especificadas. A este processo denomina-se validação de modelo.

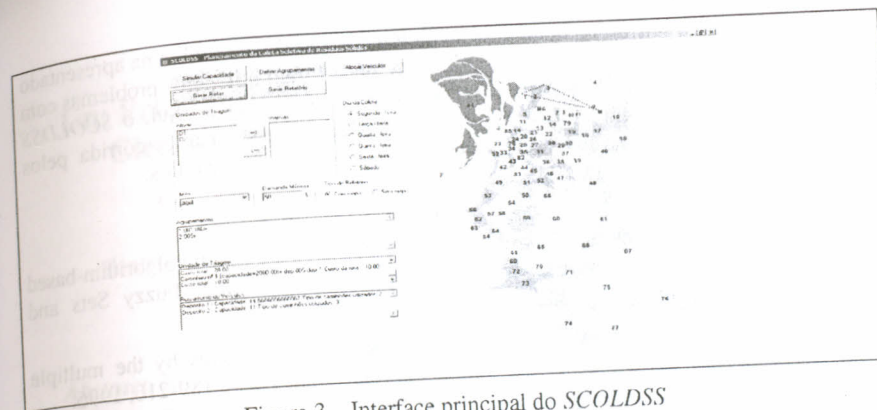


Figura 3 – Interface principal do SCOLDSS

Para a validação do módulo de simulação da capacidade de processamento de resíduos diário das unidades de triagem foram utilizados dados reais de sete unidades de triagem. Nesta validação o sistema comportou-se de maneira correta, com um desvio médio de 2.7% dos dados reais coletados, o que não compromete o desempenho do sistema, tendo em vista que a simulação trata da capacidade máxima de processamento.

Na validação da alocação e do roteamento de veículos os resultados foram bastante significativos. Para esta validação foi utilizado um problema de coleta de resíduos sólidos apresentado em Larson (1999), o qual é um problema real com dimensões diminutas. Porém, o algoritmo de Renaud (2002) apresentou melhorias aos resultados apresentados. Para o roteamento, Larson (1999) utilizou a heurística *savings* e um procedimento de melhoria do resultado (*2-Opt*) gerado pela heurística. Em ambos os casos, o algoritmo de Renaud (2002) foi superior aos resultados apresentados. Em relação ao *savings* o algoritmo apresentou resultados com custos menores na ordem de 14.4 % e, com relação ao procedimento de melhoria *2-Opt* o algoritmo apresentou resultados com custo mais baixos na ordem de 3.2%.

Utilizando-se dados reais da coleta seletiva, o SCOLDSS apresentou significativas melhorias, reduzindo, em média, 8,82% o total da distância percorrida pelos veículos de coleta, e também na redução de 17,89% (em média) do total do número de viagens destes veículos.

4. Considerações Finais

O artigo teve como objetivo principal apresentar um sistema de apoio à decisão (SCOLDSS) concebido para auxiliar gestores da área de resíduos sólidos no planejamento operacional da coleta seletiva. Basicamente, para a especificação dos requisitos e desenvolvimento do mesmo foi desenvolvida uma pesquisa em artigos científicos relativos, observações *in loco*, tanto do processo de coleta, quanto do processamento dos resíduos nas unidades de triagem e, posteriormente, feita a validação do sistema utilizando-se dados reais da coleta seletiva de resíduos de um município gaúcho.

Em uma primeira fase de validação do SCOLDSS, pôde-se constatar que o mesmo apresenta um comportamento compatível com a realidade, no caso da simulação do processamento de resíduos nas unidades e, a melhoria dos resultados no roteamento de

veículos, através da utilização do algoritmo de Renaud (2002), no problema apresentado por Larson (1999). Na segunda fase da validação, onde foram utilizados problemas com dados reais da coleta seletiva de um município do Rio Grande do Sul, o *SCOLDSS* apresentou significativas melhoras, tanto na redução da distância percorrida pelos veículos coletores, como na redução do número de viagens destes veículos.

Referências Bibliográficas

- Chang, N.; Wei, Y. Siting recycling drop-off in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, pp.133-149, 2000.
- Chung, S.S.; Poon, C.S. Evaluating waste management alternatives by the multiple criteria approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 17, pp.189-210, 1996.
- Cordeau, J.F.; et al. A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 53, pp.512-522, 2002.
- Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre. In: <http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu/coletas.htm>. Acessado em 10/02/2004.
- Fisher, M.; Jaikumar, R. A generalized assignment heuristics for vehicle routing. *Networks*, 11, pp. 109-124, 1981.
- Gillet, B.; Miller, L.R. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*, 22, pp.340-349, 1974.
- Goldbarg, M.C.; Pacca Luna, H. *Otimização combinatória e programação linear*. Campus, 2000.
- Huang, G.H.; Baetz, B.W.; Patry, G.G. Trash-Flow Allocation: Planning Under Uncertainty. *Interfaces*, Vol. 28, No. 6, pp. 36-55, Nov-Dec, 1998.
- Larson, R.C.; Odoni, A.R. *Urban Operations Research*. Massachusetts Institute of Technology, 1999. Disponível na Web em: http://web.mit.edu/urban_or_book/www/book/
- Law, A.M., Kelton, W.D. *Simulation Modeling & Analysis*. 2ª Ed., McGraw-Hill, 1991.
- Monteiro, J.H.P.; et al. *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2001.
- O'Leary, P.R.; et al.. *Decision Maker's Guide to Solid Waste Management*. Vol. 2. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999.
- Renaud, J.; Boctor, F.F. A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 140, pp. 618-628, 2002
- Simonetto, E.O.; Borenstein, D.; Dotto, B.R. SICOLSE – Um Sistema de Informação para à Gestão da Coleta Seletiva de Resíduos. *Anais do XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. UFOP-ABEPRO, Ouro Preto-MG, Outubro, 2003.
- Sprague, R.; Watson, H. *Sistemas de Apoio à Decisão: Colocando a Teoria em Prática*. Rio de Janeiro, Campus, 1991.