

**REDE REVERSA PARA RECUPERAÇÃO DE LIXO ELETROELETRÔNICO EM UM MUNICÍPIO DE PEQUENO PORTE: O CASO DE ILHA SOLTEIRA, SP**

Claudia Scoton Antonio Marques (*), Artur Pantoja Marques, Carlos Roberto Minussi

* Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho – FEIS/UNESP e-mail: clauscam@gmail.com

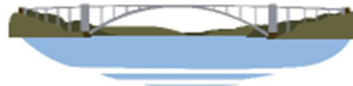
RESUMO

Os resíduos sólidos são considerados um dos maiores problemas ambientais do mundo e, conseqüentemente o gerenciamento destes resíduos também se tornaram um problema. Entre eles estão os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Dar um destino adequado ao REEE tornou-se essencial. A logística reversa, ou os canais reversos de distribuição, surgem como uma alternativa viável para isso. A redução da geração, o descarte correto desses resíduos e o reaproveitamento dos principais elementos recicláveis como insumo industrial devem ser prioridade de qualquer sistema de gerenciamento de resíduos seja público ou privado, para a preservação do meio ambiente e da saúde pública. Na presente pesquisa, o objetivo foi definir um modelo de rede reversa para REEE, buscando localizar as instalações de pontos de entrega voluntária (PEVs), o centro de triagem e o centro de tratamento, para que se alcance o menor custo de transporte. A metodologia desenvolvida ofereceu um modelo de localização com o suporte de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitiu a análise espacial dos dados, de um Processo de Análise Hierárquica (AHP) por meio do uso de conjunto de pesos para os critérios analisados e da comparação pareada, proporcionou grande flexibilidade no procedimento de agregação e da lógica fuzzy, considerada uma ferramenta eficiente para lidar com a incerteza e a subjetividade da rede reversa proposta. Estruturou-se a rede para um sistema logístico de coleta de REEE considerando o dimensionamento de muitas variáveis. Aplicou-se a rede em um município de pequeno porte, analisando-se inúmeras variáveis, entre elas a geração de resíduos, a localização de instalações de tratamento e os PEVs. Enquanto o centro de tratamento localizou-se o mais distante possível das áreas urbanas, mas evitando áreas suscetíveis a danos ambientais; os PEVs tiveram de atender ao maior número de bairros, e a menor distância possível ao Centro de Triagem. Ao cruzar esses critérios, e com o uso do ferramental proposto, foi possível definir a melhor localização para os PEVs, para o centro de tratamento e calcular o custo da rede reversa proposta. Foram observados outros pontos que poderiam ainda ser alterados e analisados. Concluiu-se que a metodologia proposta atingiu o objetivo de apoiar o tomador de decisão na resolução do gerenciamento de resíduos e, também, que a rede pode ser adaptada a qualquer município de pequeno porte, ou a bairros de cidades de grande porte. As definições adequadas dos equipamentos da coleta da rede reversa são fundamentais para esta se manter e para que o sistema de gerenciamento de resíduos municipais seja economicamente, socialmente e ambientalmente viável.

PALAVRAS-CHAVE: Logística reversa, REEE, *Lógica Fuzzy*, AHP, Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

Solid waste is considered one of the biggest environmental problems in the world and therefore the management of this waste has become a problem. These include waste electrical and electronic equipment (WEEE). Giving a proper destination to WEEE has become essential and reverse logistics, or reverse distribution channels, are emerging as a viable alternative to this. The reduction of generation, the correct disposal of this waste and the reuse of the main recyclable elements as an industrial input should be a priority of any public or private waste management system for the preservation of the environment and public health. In the present research, the objective was to define a reverse network model for WEEE, seeking to locate the facilities of voluntary delivery points, the sorting center and the Treatment Center, seeking the lowest cost of transportation. The developed methodology offered a localization model with the support of a Geographic Information System (GIS), which allowed the spatial analysis of the data, a Hierarchical Analysis Process (AHP) through the use of set of weights for the analyzed criteria and the paired comparison, provided great flexibility in the aggregation procedure and diffuse logic, considered an efficient tool to deal with the uncertainty and the subjectivity of the proposed reverse network. The network was structured for a logistic system of WEEE collection considering the sizing of many variables. The network was applied in a small municipality, analyzing several variables among them the generation of residues, the location of treatment facilities and the collectors. While the treatment center was located as far away from urban areas as possible, but avoiding areas susceptible to environmental damage; the collectors had to attend to the largest number of neighborhoods, and the shortest possible distance to the Triage Center. By crossing these criteria, and with the use of the proposed tooling, it was possible to define the best location for the collector, the treatment center and calculate the proposed reverse network cost. There were other points that could still be changed and analyzed. It was concluded that the proposed methodology reached the objective of supporting the decision-



maker in the resolution of waste management, and that the network can be adapted to any small municipality or to large city districts. The proper definition of the equipment of the collection of the reverse network are fundamental for this to be maintained and for the municipal waste management system to be economically, socially and environmentally viable.

KEY WORDS: WEEE, Reverse Logistic, Fuzzy Logic, AHP, Solid waste.

INTRODUÇÃO

Nessas últimas décadas, o acelerado desenvolvimento de novas tecnologias e de novos materiais, bem como a redução dos custos de embalagens, computadores, eletrodomésticos, carros entre outros, contribuíram para a geração de produtos com ciclos de vida útil cada vez mais curto e com uma clara tendência a descartabilidade, levando a um dos maiores problemas ambientais do planeta: os resíduos sólidos.

Segundo o relatório *Reciclando - Do lixo eletrônico a recursos*, divulgado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2010), o mundo gera 40 milhões de toneladas de lixo eletrônico por ano e, até 2020, esse número deve crescer entre 200% a 400%. E segundo Estrada (2005), apenas 11% desse lixo é reciclado no mundo.

A concepção das redes reversas é um dos problemas mais importantes dentro do campo da logística reversa, pois a incerteza é inerente durante o processo de recuperação. Estruturar e planejar um sistema logístico de coleta de REEE é uma atividade complexa pois, além de ser preciso o dimensionamento de muitas variáveis, existe a incerteza que rege a geração de resíduos perigosos, os erros de estimativa em valores de parâmetros e a indefinição de objetivos de ordenamento e condicionantes. Outro importante problema de planejamento é localizar instalações de tratamento ou aterros. Enquanto tais instalações estão localizadas muito longe de áreas urbanas, que geram a maior parte do lixo eletrônico, os custos operacionais do transporte de resíduos tendem a aumentar. Por isso, há necessidade de minimizar os custos de transporte.

OBJETIVO

O objetivo precípua desta pesquisa foi a determinação de uma rede logística reversa para recuperação de lixo eletroeletrônico (REEE) permitindo agregar valor ao bem retornado. E, assim, localizar as instalações de pontos de entrega voluntária (PEVs), centro de triagem e de tratamento com apoio de um SIG, de um processo de Análise Hierárquica (PHA) e da Lógica *Fuzzy*, para auxiliar o tomador de decisão no gerenciamento de resíduos em um município de pequeno porte.

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

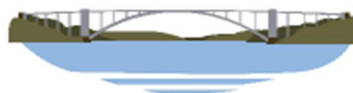
O gerenciamento integrado de resíduos sólidos é um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que uma administração municipal desenvolve (com base em critérios sanitários, ambientais e econômicos), para coletar, segregar, tratar e dispor o lixo de sua cidade (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). Assim, o gerenciamento depende de um conjunto de ações de curto, médio e longo prazo. Para cada ação existem várias alternativas, tanto em relação a locais de instalações do gerenciamento de resíduos sólidos, como aspectos técnico-operacionais (roteirização, sistema de coleta, sistema de triagem etc.) (MARQUES, 2004a).

O aproveitamento dos resíduos pode ser considerado como uma alternativa econômica, social e ambientalmente adequada, sendo que o gerenciamento adequado desses materiais pode reduzir os impactos da extração da matéria-prima, dar um destino adequado ao resíduo e minimizar os impactos ambientais das atividades produtivas

RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Equipamentos eletroeletrônicos são todos aqueles produtos, cujo funcionamento depende do uso da eletricidade (Diretriz 2002/96/EC, 2003). Eles podem ser divididos em quatro categorias amplas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE- FEAM, 2009):

- Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;
- Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;
- Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;



- Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, *tablets* e telefones celulares.
-

Ao fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou simplesmente lixo eletroeletrônico (ee-lixo). Porém, só chegam a esse ponto uma vez esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso.

Todo ano, segundo o PNUMA (2010), entre 20 e 50 milhões de toneladas de “lixo eletroeletrônico” são gerados por ano, e compreendem mais de 5% dos resíduos sólidos urbanos. Nos países desenvolvidos os REEE chegam a representar 1% dos resíduos sólidos gerados (PNUMA, 2010). A geração de REEE na União Europeia varia de 5 a 7 milhões de toneladas por ano, ou cerca de 14kg ou 15kg *per capita*. É esperado que cresça de 3% a 5% ao ano, três vezes mais rápido do que o crescimento da geração de resíduos anuais municipais. Em países em desenvolvimento, a geração de REEE é estimada entre 0,01% e 1% do total de resíduos sólidos urbanos gerados (FEAM, 2009).

LOGÍSTICA REVERSA

Do ponto de vista logístico, a vida de um produto não termina com sua entrega ao cliente. Os produtos se tornam obsoletos, danificados, ou não funcionam e devem retornar ao seu ponto de origem para serem adequadamente reparados, reaproveitados ou reciclados, podendo, assim, estender sua vida. Essas opções podem significar benefícios ao meio ambiente.

Os materiais reciclados podem ser usados para criar novos produtos, voltando ao fluxo direto como matéria-prima secundária. Produtos com componentes modulares (como equipamentos eletrônicos, computadores) que podem ser reutilizados e/ou renovados terão seu preço mais baixo do que o mesmo produto feito pela primeira vez. Entretanto, o valor será substancialmente mais alto que itens que são vendidos para sucata ou reciclagem (STOCK¹ 1992, apud FLEISCHMANN, 2001).

O objetivo principal da Logística Reversa é agregar valores econômicos, ecológicos e legais ao produto retornado, ou seja, tornar possível o retorno de bens ou de seus componentes ao ciclo produtivo. Tem como finalidade também, planejar redes reversas e operar o fluxo reverso desde a coleta dos bens até a sua disposição final, seja para a reintegração do bem ao ciclo produtivo ou o descarte.

De acordo com Fleischmann (2001, p. 15), as atividades da Logística Reversa aumentam o fluxo de bens dos consumidores para os produtores. No gerenciamento deste fluxo, oposto ao fluxo convencional está a importância do campo da Logística Reversa.

Assim, para a rede reversa do lixo eletroeletrônico é necessário lembrar que é preciso que haja rentabilidade em todas as fases, a participação das organizações públicas e privadas e da sociedade para que a sustentabilidade do processo seja alcançada.

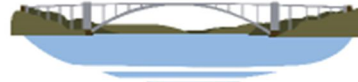
REDE REVERSA PARA RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS

A logística reversa envolve atividades como o retorno, o condicionamento, a remodelação e a reciclagem de produtos e embalagens. Desse modo a infraestrutura das redes reversas precisa coletar os produtos usados, transportá-los para triagem e eventualmente encaminhá-los para outro uso. Algumas questões a respeito disto precisam ficar claras como: qual o número de camadas na rede; o número e a localização de depósitos ou pontos intermediários; pontos de coleta, para que seja eficiente e beneficie a empresa.

Fleischmann (2001, p. 46) afirma que a etapa de retorno ou coleta caracteriza-se pela participação dos canais de retorno e passou a chamar a Logística Reversa de “Rede de Recuperação de Produtos”. A partir de então, o valor é adicionado ao produto e este se move do produtor (que recuperou o produto) para o usuário como na cadeia tradicional.

Ao implantar a rede reversa pode-se reduzir o custo e melhorar a taxa de utilização dos materiais. Pode-se, também, aumentar o lucro de uma empresa e criar uma boa reputação empresarial. Além disso, é uma boa maneira de melhorar a satisfação e lealdade do cliente e depois manter uma vantagem competitiva sustentável (Brito e Dekker, 2002).

¹STOCK, J.R. *Reverse Logistics Programs*. Illinois: Council of Logistics Management, 1992 apud FLEISCHMANN, M. *Quantitative Models for Reverse Logistics*. Springer, 2001.



As redes de recuperação apresentam alguns fatores discriminantes como a complexidade da rede e a incerteza quanto à quantidade e qualidade do material para recuperação na entrada do processo de recuperação. Portanto, percebe-se que para uma organização compor a sua rede de recuperação é fundamental que ela conheça o tipo de produto a ser recuperado, sem esquecer de definir os envolvidos e principalmente verificar se há mercado para o produto recuperado. (THIERRY,1995).

Embora a logística reversa seja um novo campo que tenha obtido atenção apenas na última década, muitos estudiosos realizaram pesquisas sobre logística reversa. Fleischmann et al. (1997) logística reversa é dividida em três áreas principais: planejamento de distribuição, controle de estoque e planejamento de produção. Revisaram os modelos matemáticos quantitativos propostos na literatura para cada uma dessas áreas. Alguns pesquisadores propuseram estruturas conceituais de decisão sobre logística reversa, como De Brito e Dekker (2002) e Lambert et al. (2011). Ambos propuseram uma estrutura conceitual de decisão para logística reversa em termos de decisões estratégicas, táticas e operacionais. Além disso, notou que o design de rede de logística reversa pertence a decisões estratégicas.

O projeto de uma rede de recuperação de produtos é um dos problemas importantes e desafiadores no campo da logística reversa (QIN e JI, 2010). Muitos pesquisadores realizaram análises quantitativas de redes de recuperação de produtos e propuseram modelos matemáticos. No entanto, a maior parte dos estudos concentrou-se apenas no custo total ou no lucro, entre eles Jayaran Ian et al. (2003), Min et al. (2006), e Salema et al. (2007), Lee e Dong (2008), Alumur et al. (2012), Das e Chowdhury (2012), Lieckens e Vandaele (2012), Li, et al (2012). Cada um propôs um modelo matemático e considerou o custo total ou o lucro para ser um único objetivo, e função em seus estudos. Outros autores conduziram pesquisa sobre modelos matemáticos de localização de aterros sanitários, entre eles o estudo desenvolvido por Hong et al. (2006 apud Matos, 2012) exploraram o modelo MILP em relação à análise e estrutura dos sistemas de produção reversa sobre REEE, como TVs e computadores. O modelo buscou maximizar o lucro. Aplicaram o modelo em um sistema de eletrônicos usados no Estado da Geórgia, EUA.


Rede Reversa para REEE's

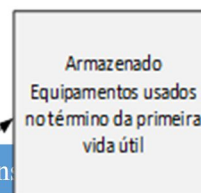
O lixo eletrônico é considerado resíduo ou resto de produto eletroeletrônico. Eles podem ser divididos em quatro categorias amplas (FEAM, 2009): linha Branca; linha Marrom; linha Azul; linha Verde.

Ao fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou simplesmente lixo eletrônico (e-lixo). Mas só chegam a esse ponto uma vez esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso.

Os problemas de design geralmente envolve múltiplos e conflitantes objetivos como custo, utilização de recursos e serviço, entre outros. Alguns pesquisadores estudaram a otimização multiobjetiva das redes logísticas reversa. Ioannis, (1998) propôs um modelo multiobjetivo para localizar instalações de disposição ou tratamento e para o transporte de resíduos perigosos ao longo de uma rede de transporte. O objetivo era a minimização do custo operacional total, a minimização do risco total, a distribuição do risco entre os centros populacionais e a distribuição da desutilidade causada pela operação das instalações de tratamento e foi proposta um modelo de programação de multiobjetiva fuzzy para resolver o problema.

O lixo eletrônico é considerado resíduo ou resto de produto eletroeletrônico. Eles podem ser divididos em quatro categorias amplas (FEAM, 2009): linha Branca; linha Marrom; linha Azul; linha Verde. Ao fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), ou simplesmente lixo eletrônico (e-lixo). Mas só chegam a esse ponto uma vez esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso. A Figura 1 apresenta as atividades da Logística Reversa de REEE's.

 Foco da logística reversa de REEEs



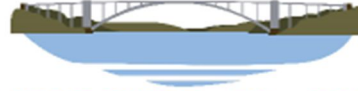


Figura 2: Atividades da Logística Reversa de REEEs. Fonte: Adaptado de ABID, (2012, p.26, apud Leite, 2003)

Para Wolfér, Sander e Gogoll, (2011) a variedade de características do material de e-lixo, juntamente com diversas regulamentações ambientais tornou o problema de tratamento de lixo eletrônico mais complexo, exigindo, portanto, medidas de solução específicas, tais como controle e gerenciamento da logística reversa e a programação linear inteira mista (MILP) para determinar a configuração física de um sistema de logística reversa para REEE's

METODOLOGIA

Esta pesquisa descreveu das características dos REEE e de sua rede reversa bem como dos processos operacionais relativos ao sistema logístico reverso. Definiu-se uma rede reversa para o e-lixo com apoio da lógica Fuzzy, SIG e da Análise Hierárquica de Processo (AHP).

Três objetivos foram considerados nesta pesquisa: minimização do custo total da logística reversa; minimização da distância entre os pontos de coleta e o centro de tratamento e a maximização da distância entre a área urbana e o centro de tratamento. A fim de minimizar os custos de transporte, os pontos de entrega voluntária, o centro de Tratamento e o centro de Triagem foram definidos com base em um sistema de informação geográfica e análise multicritério (AHP) com apoio da lógica *fuzzy*.

Os problemas de localização de estação de tratamento ou aterros sanitários normalmente enfrentam objetivos conflitantes, tais como custos e riscos, por isso é difícil de formular e resolver (WANG, YIN, MA, 2008). Os parâmetros e as variáveis de decisão foram definidos a partir das funções e características definidos para a rede reversa, bem como o algoritmo *fuzzy* utilizado.

Em função do modelo genérico de uma rede de recuperação de produtos proposta por Fleischmann (2001) foi definido uma rede reversa para o município de Ilha Solteira, SP. A rede consistiu em 4 atividades críticas: (1) coleta, (2) transferência, (3) tratamento, e (4) distribuição. Criou-se então o modelo linear multiobjetivo, com os objetivos de: (1) minimizar o custo total, (2) minimizar a distância entre a estação de transferência e a estação de tratamento; (3) maximizar a distância entre a estação de tratamento e a área urbana.

O custo total da rede de logística reversa é um importante critério, assim como os pontos de coleta deveriam estar dentro de uma distância máxima para o cliente, e cobrir o máximo de bairros possíveis, o centro de tratamento deve ser locado o mais distante possível da área urbana. Assim, os principais problemas que surgiram para o modelo foram os seguintes: (1) Quais locais devem ser escolhidos para os pontos de coleta? (2) Onde localizar a estação de transferência para minimizar a distância até a estação de tratamento e maximizar a distância até a área urbana? (3) Quantos pontos de coleta serão necessários? (4) Qual o custo total da rede reversa? Assim, formulou-se a rede de logística reversa como um modelo de programação multiobjetivo. A Figura 3 apresenta o rede proposta

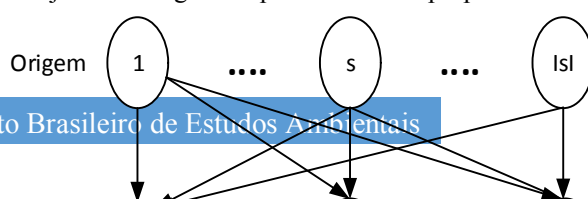




Figura 3: Rede de reciclagem de REEE de um sistema de logística reversa. Fonte: Adaptado de Fleischmann, 2001.

Parâmetros e variáveis de decisão

Os parâmetros estão definidos como se segue:

$i \in I$: índice para PEVs nos bairros;

$j \in J$: índice para estação de triagem;

$k \in K$: índice para estação de tratamento;

H_i : tamanho da população da área estudada i ;

γ : quantidade de resíduos gerados por dia por pessoa;

G_k : custo fixo para a abertura de estação de tratamento;

M_i : custo fixo para a abertura de ponto de coleta;

F_j : custo fixo associado para melhorias da estação de triagem no local j ;

d_{ij} : distância entre o PEV i e a estação de triagem j ;

d_{jk} : distância entre a estação de triagem j e a estação de tratamento k ;

d_{ik} : distância entre o bairro i e a estação de tratamento k ;

β : custo unitário de transporte por km por quantidade;

D : máxima cobertura da área relacionada aos PEVs.

Variáveis de Decisão:

$$X_j \begin{cases} 1, & \text{se a estação de triagem estiver localizada em } j \\ 0, & \text{se a estação de triagem não estiver localizada em } j \end{cases}$$

$$Z_i \begin{cases} 1, & \text{se ao bairro } i \text{ é destinado um ponto de coleta } i \\ 0, & \text{se ao bairro } i \text{ não é destinado um ponto de coleta } i \end{cases}$$

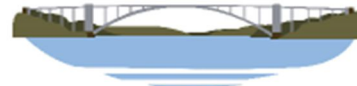
$$Y_k \begin{cases} 1, & \text{se a estação de tratamento estiver localizada em } j \\ 0, & \text{se a estação de tratamento não estiver localizada em } j \end{cases}$$

Para a rede reversa proposta, algumas suposições foram necessárias como: (1) A área de geração de lixo eletrônico foi considerada urbana e rural; (2) O custo do transporte é linearmente proporcional à distância percorrida. (3) A taxa de geração de REEE é constante em nosso período de planejamento. (4) Os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) deverão ser definidos com base na menor distância de transporte para os consumidores. (5) Existe uma local que poderá funcionar como estação de transbordo; (6) Construção de uma estação de tratamento, próxima a de transbordo e distante da área urbana, preferencialmente.

Formulação do problema

Antes de desenvolver o modelo de otimização multiobjetiva, foi pressuposto:

- (1) A possibilidade de envio direto de REEE pelo cliente para uma estação de tratamento é descartada;
- (2) Um PEV possui uma capacidade suficiente para receber os REEE.



- (3) Os custos de transporte entre os clientes e o PEVs que se localiza no mesmo bairro são insignificantes devido as curtas distâncias entre eles;
- (4) O plano de localização abrange um horizonte de planejamento dentro do qual nenhuma mudança substancial é incorrida nas demandas dos clientes e na infraestrutura de transporte.

O modelo é formulado abaixo:

$$\min \left\{ \sum_j (F_j X_j) + \sum_i (Z_i M_i) + \sum_k (G_k Y_k) + \beta \left[\sum_i \sum_j (H_i \cdot \gamma \cdot Z_i \cdot d_{ij}) + \sum_j \sum_k (Y_k d_{jk}) \right] \right\} \quad (10)$$

min W

max P

Sujeito a:

$$Z_{ij} \leq X_j, \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$\sum_k d_{ik} Y_k \geq P, \forall i \in I \quad (14)$$

$$w \geq \sum_j d_{jk} X_j, \forall j \in J \quad (15)$$

$$d_{ij} Z_{ij} \leq D \quad (16)$$

$$\sum_k Y_k = 1 \quad (17)$$

$$X_j \in (0,1), \forall j \in J \quad (18)$$

$$Z_{ij} \in (0,1), \forall i \in I, j \in J \quad (19)$$

$$Y_k \in (0,1), \forall k \in K \quad (20)$$

A equação 10 minimiza o custo total incluindo o custo fixo para abrir uma estação de tratamento e custo de transportes. A equação 11 minimiza a distância entre a estação de triagem e de tratamento, como é definido na restrição (15). A equação 12 maximiza a distância entre a estação de tratamento e a área urbana, como é definido na restrição (14). A restrição (13) garante apenas que um PEV poderá receber os resíduos do bairro que é atribuído a ele, enquanto a restrição (16) determina a área de geração não deve ser atribuído à PEV que não pode cobri-lo. A restrição (17) significa apenas uma estação de tratamento será construída. As restrições (18), (19) e (20) aplicam a restrição sobre a integralidade das variáveis de decisão.

As configurações de rede do sistema de e-lixo exigiram a escolha de locais viáveis para construir a estação de tratamento, minimizar o custo total de construção e transporte. Os locais para Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) também foram definidos com apoio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

A cidade de Ilha Solteira, SP, localiza-se no extremo noroeste do estado de São Paulo, Brasil, possui uma população total de 26.443 (IBGE, 2016). O volume médio estimado de REEE para Ilha Solteira baseou-se na metodologia consumo e uso, uma vez que a Prefeitura Municipal não possuía este dado. Para fins de simplificação da análise a rede proposta foi desenvolvida para REEE de pequeno e médio porte, linhas verde, marrom e azul, pois os de grande porte deveriam ser recolhidos nas residências. O cálculo baseou-se no censo demográfico (IBGE, 2010), assim a geração de REEE per capita média estimada foi de 2,62kg/habitante. Adotando-se a frequência de uma coleta a cada 15 dias, e PEV de 1 tonelada, calculou-se que o número necessário de PEV foi de 3.

Para a definição da melhor localização dos Pontos de Entrega Voluntário uma variável definida foi a distância máxima do mesmo até o usuário. Este é um fator extremamente relevante, pois para que o programa de coleta seletiva se desenvolva a população tem que estar comprometida a participar, segundo Torre et al (2003, apud Peixoto, Campos e D'Agosto, 2005) e Chang e Wei (1999, apud Peixoto, Campos e D'Agosto, 2005) quanto menor a distância de caminhada, maior é a participação da população, e indicaram um limite de 1,0km para que um cidadão típico vá até o PEV caminhando e de 1,5km de carro. A Figura 2 apresenta o fluxograma para a definição da localização dos PEVs.



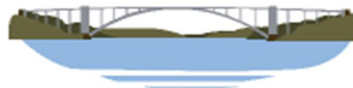


Figura 4 - Fluxograma para dos PEVs. Fonte: Autoria própria.

Para completar a rede foi preciso definir também a localização do Centro de Triagem e do Centro de Tratamento. Os centros de triagem são estruturas que recebem os REEE, realizam a separação, triagem e expedição para as recicladoras ou centros de tratamento. Cabe lembrar que o modelo mais inteligente para a definição dos centros de triagem seria a partir de uma otimização da malha logística. Mas normalmente estes centros se localizam em municípios de pequeno porte, em cooperativas de coleta de lixo reciclável.

A fim de definir os possíveis locais que poderiam funcionar como pontos de coleta, e de tratamento, agregou-se as áreas de geração de resíduos eletrônicos em 7 centros populacionais, localizados em bairros e escolas do município. A definição do melhor local foi desenvolvido pela análise geoespacial feito no software QGIS, análise hierárquica (AHP) e, pela função triangular *fuzzy*. Para completar a rede foi preciso definir também a localização do Centro de Triagem. Os centros de triagem são estruturas que recebem os REEEs, realizam a separação, triagem e expedição para os centros de tratamento.

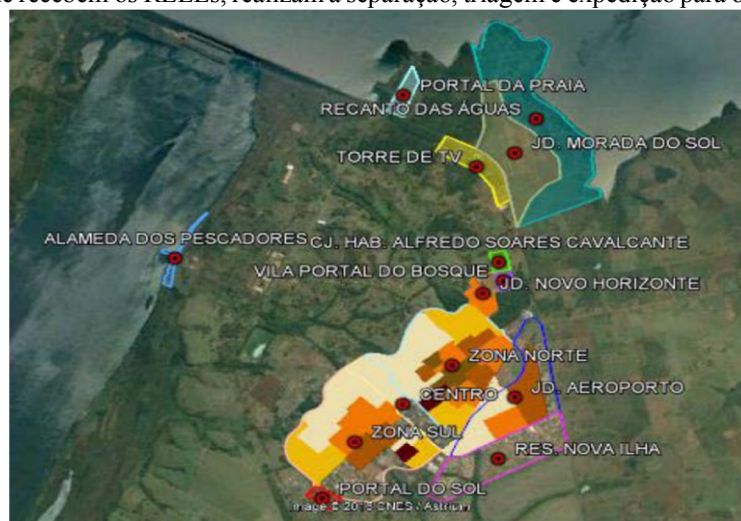
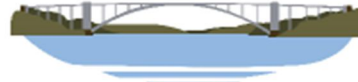


Figura 5: Bairros e possíveis localizações dos PEVs, Centros de Triagem ou Tratamento. Fonte: Autoria própria
Outro fator importante foi a distância à malha viária. Segundo Guiqin, et al. (2009), a distância da malha viária não deve exceder 500m, e não deve ser inferior a 100m para que o descarregamento dos REEE não atrapalhe o fluxo da rodovia.



RESULTADOS

Basicamente, os REEEs são recolhidos e transferidos para unidades de reciclagem. A distribuição espacial dos pontos de coleta, dos locais de processamento e o transporte desses resíduos foram igualmente considerados no modelo lógico da rede de recuperação de resíduos adotado, mantendo o sistema de gerenciamento de resíduos eficaz e minimizando os custos para permitir a viabilidade da rede. Para a definição da rede reversa de REEE no município estudado foi necessário inicialmente montar a base de dados georreferenciada no QGIS, com delimitação da área de estudo (Figura 6).



Figura 6: Área de Estudo. Fonte: Elaborado pelo autor

Na segunda etapa foram elaborados os mapas de distância do centro de triagem (CTR), dos centros de tratamento (CTS), dos pontos de entrega voluntária (PEVs), da malha viária, do centroide dos setores-bairros, do perímetro urbano.

A terceira etapa foi a elaboração dos mapas *Fuzzy*. Para normalização dos mapas foi aplicada a técnica de fuzzificação por meio do algoritmo “*Fuzzify*” do módulo SAGA, que implementa a lógica difusa ao conjunto de mapas de entrada. A função triangular *fuzzy* utilizada para a normalização do critério usada foi a mostrada da figura 7.

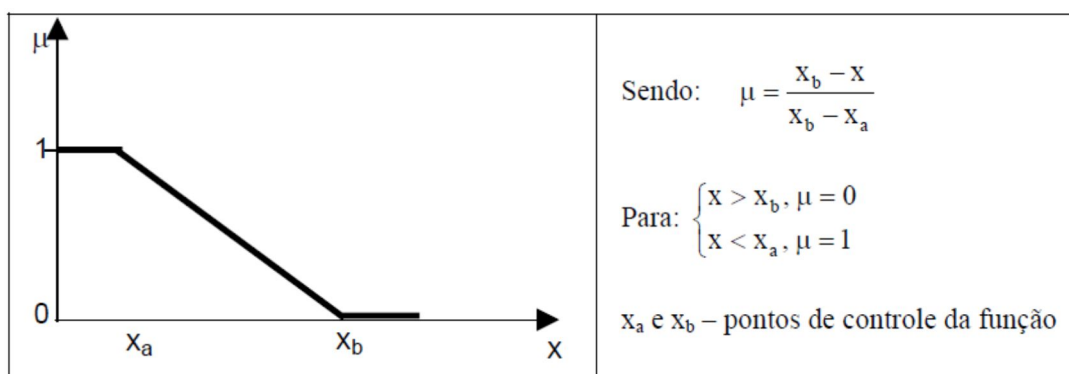


Figura 7: Função *Fuzzy*. Fonte: Zambon et al., (2005)

Foram fuzzificados todos os mapas de distância, como mostra o exemplo da Figura 8. Outro mapa feito foi o de quantidade de resíduos de equipamento eletroeletrônico produzida por setor (bairro): denominado de “FUZZY_REEE_SB”. A

próxima etapa foi a aplicação do processo hierárquico analítico AHP e combinação linear ponderada para os mapas FUZZY.

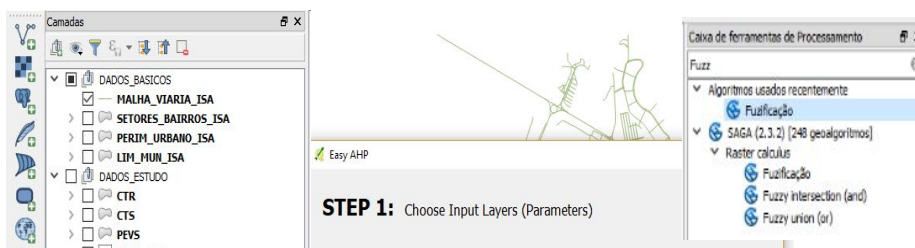
Figura 8: Mapa *Fuzzy* para padrão de distância ao centro de triagem “FUZZY_DI_CTR”. Fonte: Autoria própria

O método aplicado neste trabalho foi o de comparação par a par no contexto do processo de tomada de decisão denominado AHP (Analytic Hierarchy Process). Para Zambon (2005) não há um método consensual para a definição de pesos, mas várias propostas de procedimentos para este efeito podem ser encontradas na literatura (Von Winterfeldt e Edwards, 1986; Malczewski, 1999 apud ZAMBON et al. 2005). Os critérios para localização dos PEVs e Centro de Tratamento par a par neste trabalho foram definido de acordo com a literatura estudada.

Para obtenção dos mapas ponderados foi utilizado o algoritmo complementar “Easy AHP”. Os pesos seguiram escala conforme o grau de importância para combinações pareadas (SAATY, 2005, apud VARGAS, 2010). O procedimento consistiu em selecionar os mapas FUZZY correspondentes aos critérios. Foram atribuídos pesos para os parâmetros (em função de sua contribuição) e calculado os indicadores de vetor máximo (λ_{max}), índice de consistência (CI) e a razão de consistência (CR). Em seguida foi definido o mapa ponderado para os centros de tratamento (CTS). O procedimento consistiu em selecionar os mapas FUZZY correspondentes aos critérios (Figura 8);

Os locais pré-selecionados para o Centro do Tratamento foram definidos de acordo com o plano diretor do município, considerando também as condições de preservação ambiental. Outros fatores foram observados como maior distância possível a área urbana (evitando cheiro, barulho, danos à saúde pública, entre outros), mínima distância ao Centro de Triagem e a malha viária, mínimo de 100m e máximo de 500 m, para não atrapalhar o descarregamento e processamento dos resíduos e nem o fluxo da rodovia). É importante lembrar também que o centro de tratamento precisa de uma área mínima de 500m² (GUIQIN, et al. 2009). Por fim o mapa final com os resultados das análises dos PEVs e Centro de Tratamento apresenta como favorável a região do CT1 Aterro Sanitário (Figura 8).

A Figura 9, é ilustrado o mapa *FUZZY* resultante deste processo.



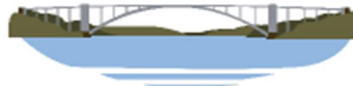


Figura 8 – PAH: Seleção dos mapas FUZZY, parâmetros PEVs. Fonte: Elaborado pela autora

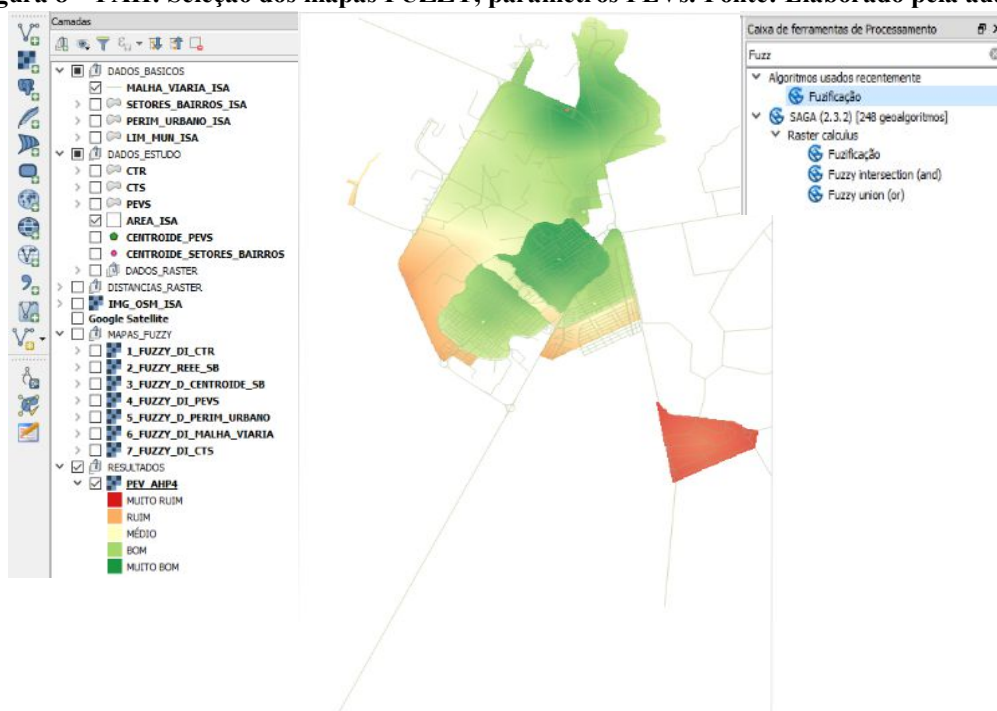


Figura 9: Mapa FUZZY “PEV_AHP4” Resultado da Combinação Linear Ponderada para matriz PEV. Fonte: Elaborado pela autora

Após a definição das localizações dos PEVS, do Centro de Triagem e do centro de Tratamento, e já com o volume de REEE produzidos, com o custo do Transporte por tonelada coletada e transportada, pode-se calcular o custo da rede.

Lembrando que, o objetivo é minimizar os custos de transporte, maximizar a distância do Centro de tratamento à área urbana e minimizar a distância do Centro de triagem ao centro de tratamento.

O resultado da análise apresenta como favorável os PEVS: (2) Urubupungá, (3) Arno Hauser, (4) EMEI Jd. Aeroporto, (5) C.C. Novo Horizonte e (7) Cooperseli. Sendo escolhido 4 PEVs (2), (4), (5) e (7). Por apresentarem melhor configuração geométrica.

Na Figura 10 ilustra-se o mapa com o resultado final, ou seja, os PEVs, Centro de Triagem e Centro de Tratamento.

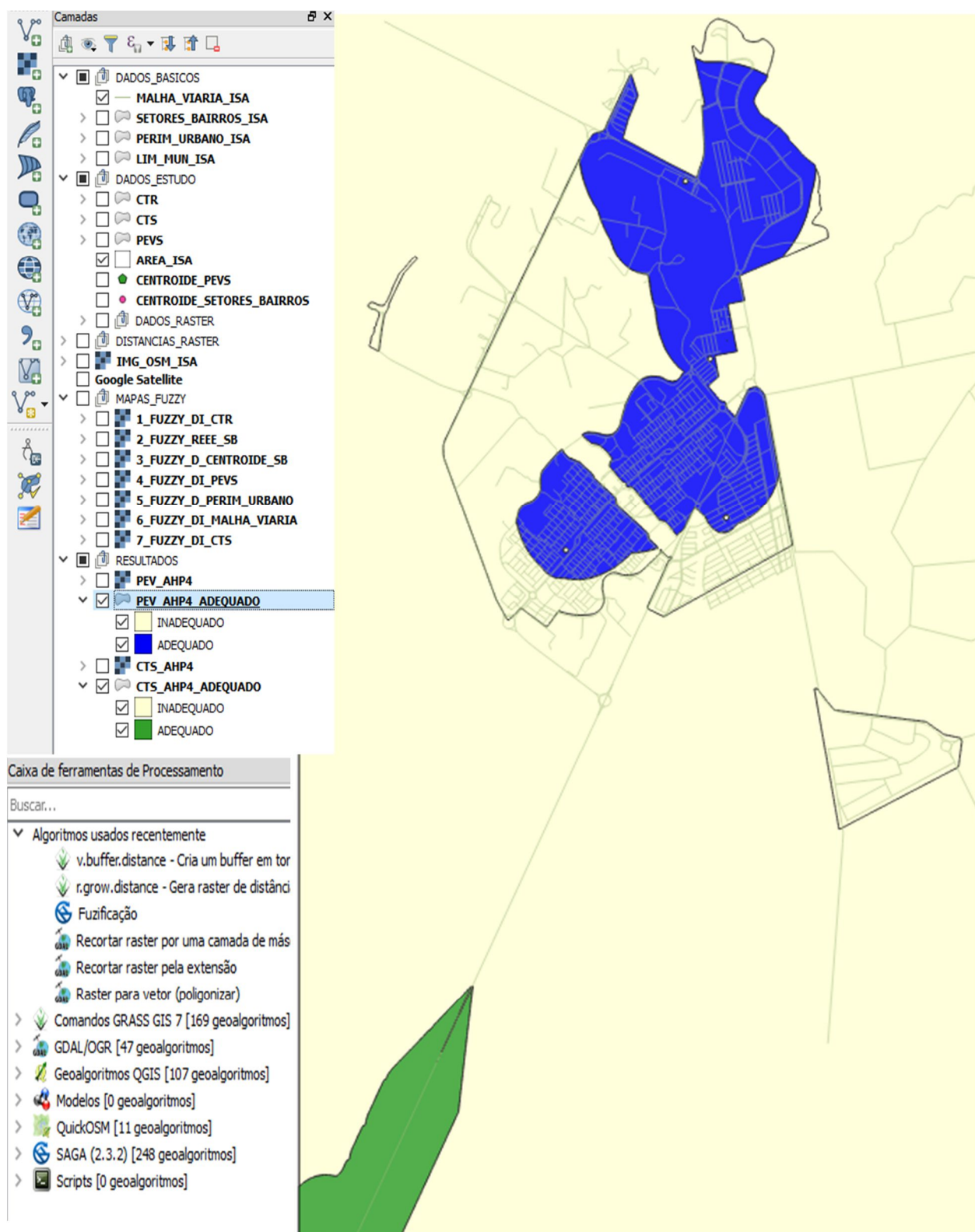
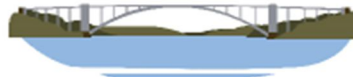


Figura 10: Resultado final da rede reversa. Fonte: Elaborado pelo autor

O custo final da rede, com os PEVs localizados no Zana Sul (PEV2), no Jardim Aeroporto (PEV4), no jardim Novo Horizonte (PEV5) e mantendo a possibilidade de o Centro de Triagem funcionar como Ponto de Entrega Voluntária (PEV7), e o Centro de Tratamento situado no Aterro Sanitário, foi de aproximadamente R\$5,7 milhões.



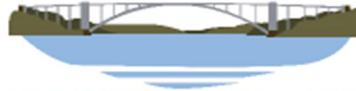
CONCLUSÃO

A integração da análise espacial, por meio do SIG, da análise hierárquica AHP e da lógica fuzzy para a escolha dos locais para os PEVs e para o centro de tratamento, permitiu um resultado claro e conciso, auxiliando na escolha do melhor local. É importante observar que a decisão de onde localizar um centro de tratamento ou um PEV é, muitas vezes, uma questão política e não apenas científica e depende fortemente do apoio da sociedade para que a rede reversa funcione e se mantenha.

Concluiu-se que a metodologia proposta atingiu o objetivo de apoiar o tomador de decisão na resolução do problema de gerenciamento de REEE. Notou-se, também, que a rede pode ser adaptada a qualquer município de pequeno porte, ou a bairros de cidades de grande porte. As definições adequadas dos equipamentos da coleta da rede reversa são fundamentais para esta se manter e para que o sistema de gerenciamento de resíduos municipais seja econômica, social e ambientalmente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Lei nº 12.305/10 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos: altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 12 ago. 2010.
- Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, 17 de março de 2005**. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamentos de efluentes nos corpos receptores e dá outras providências.
- Chen, Y. W.; Wang, C. H.; Lin, S. J. A multi-objective geographic information system for route selection of nuclear waste transport. **International Journal of management Science**, Ghaziabad, v. 36, n. 3, n.p., 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/omega>. Acessado em: 15 mar 2017.
- Fleischmann, M. **Quantitative Models for Reverse Logistics**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- Fundação Estadual Do Meio Ambiente- Feam. **Diagnóstico da geração de resíduos eletroeletrônicos no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Governo de Minas Gerais, 2009. 85 p.
- Guiqin, W.; Li, Q; Gouxue, L.; Lijun, C. L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: A case study in Beijing, China. In: **Journal of Environmental Management**. p. 2414-2421, 2009.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2010. Diretoria de Pesquisas, Departamento de População e Indicadores Sociais, **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> Acessado em 12 mai. 2011.
- Marques, C. S. A.; Aguiar, E. M. de. Reverse logistics: an important tool for the solid waste management. In: **Global Conference On Sustainable Product Development And Life Cycle Engineering**, 1., 2004, Berlin. Conference.... Berlin: Uni-edition, 2004b. v. 1, n.1, p.149 – 154..
- Peixoto, K., Campos, V.B. G., D'agosto, M. A. **Localização de Equipamentos para Coleta Seletiva de Lixo Reciclável em Área Urbana**. 2005 Disponível em: [http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/vania/pubs/\(4\)coletaseletiva.pdf](http://aquarius.ime.br/~webde2/prof/vania/pubs/(4)coletaseletiva.pdf). Acessado em: 24 mar. 2016.
- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente PNUMA., **Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies: Recycling – from E-Waste to Resources**. 2010. Disponível em:<http://www.unep.org/PDF/PressReleases/E-Waste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf>. Acesso em 20 jun.2010.
- Santos, R. F., Marins, F. A. S. Integrated model for reverse logistics management of electronic products and componentes. **Procedia Computer Science**, vol. 55, p. 575–585, 2015. Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S1877050915015227/1-s2.0-S1877050915015227-main.pdf?_tid=64f49ad4-724a-11e7-9e41-00000aabb0f2&acdnat=1501105131_a247f4ee078da4a476afab3232b54425. Acessado em: 16 mai.2017.
- Vargas, R. V. **Utilizando a Programação Multicritério (Analytic Hierarchy Process AHP) para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portfólio**. PMI Global Congress, North America, Washington, DC, EUA, 2010. Disponível em: <http://www.leansixsigma.com.br/acervo/2215922.pdf>. Acessado em: 12 mai. 2015.
- Wang, Z.; Yin, J.H.; Ma, W. A Fuzzy Modeling and Solution Algorithm for Optimization on E-Waste Reverse Logistics. In: **Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics**. IEEE. Kunming, jul, 2008. p. 472-478.
- Wang, G.; Qin, L.; Li, G.; Chen, L. Landfill site selection using spatial information technologies and AHP: a case study in Beijing, China. **Journal Environmental Management**, London, v. 90, n. 8, p. 2414- 2421, 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/1903891/Landfill_site_selection_using_spatial_information_technologies_and_AHP_A_case_study_in_Beijing_China>. Acessado em: 3 mar.2017.



15. Wolfer, S.; Sander, H.; Gogoll, F. **Reverse logistics for waste electrical and electronic equipment (WEEE) in China**: application of linear programming to eco-innovation in industry. Germany: Institute of Global Business and Society – Cologne University of Applied Sciences. 2011. 31p. (Globus Working Paper).
16. ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A.F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. Pesquisa Operacional, vol.25, n.2, Rio de Janeiro, RJ, 2005.