

## MODELO MATEMÁTICO PARA ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA COPROCESSAMENTO

## MATHEMATICAL MODEL FOR STRUCTURING THE REVERSE LOGISTICS SYSTEM OF MUNICIPAL SOLID WASTE TO COPROCESSING

Yuka Akasaka\* E-mail: [yuka.akasaka@pet.coppe.ufrj.br](mailto:yuka.akasaka@pet.coppe.ufrj.br)

Márcio de Almeida D'Agosto\* E-mail: [dagosto@pet.coppe.ufrj.br](mailto:dagosto@pet.coppe.ufrj.br)

Glaydston Mattos Ribeiro \* E-mail: [glaydston@pet.coppe.ufrj.br](mailto:glaydston@pet.coppe.ufrj.br)

\*Programa de Engenharia de Transporte – COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, RJ

**Resumo:** O sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano (RSU) pode se apresentar com várias estruturas. Este trabalho foca na estruturação do método de combustão com recuperação energética pelo coprocessamento, devido à contribuição que este método traz na diminuição do envio de RSU ao aterro sanitário. Com base em uma extensa revisão bibliográfica e avaliação das técnicas de modelagem e dos métodos utilizados na literatura para a resolução de problemas similares, elaborou-se um modelo matemático genérico para estruturação do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento. Este modelo pode ser utilizado futuramente para projetar adequadamente este sistema e assim contribuir para a diminuição do descarte de RSU no aterro sanitário.

**Palavras-chave:** Logística reversa. Gestão de resíduos. Problema de localização-alocação de facilidade. Problema de tomada de decisão multiobjectivo. Revisão bibliográfica narrativa.

**Abstract:** The reverse logistics system of municipal solid waste (MSW) can be structured in many ways. This work focuses in structuring the combustion method with energy recovery by coprocessing, due to the contribution that this method brings in decreasing the disposal of MSW to landfill. Based on an extensive literature review and evaluation of the modeling techniques and methods used in the literature to solve similar problems, a generic mathematical model for structuring the reverse logistics system of MSW to coprocessing was defined. This model can be used in future to properly design this system and thus contribute to the reduction of MSW disposal in landfill.

**Keywords:** Reverse logistics. Waste management. Facility location-allocation problem. Multi-objective decision making problem. Narrative literature review.

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de gestão do resíduo sólido urbano (RSU) pode se apresentar com várias estruturas e, conseqüentemente, com resultados diversos devidos não apenas à composição gravimétrica do resíduo, mas também ao histórico de desenvolvimento deste tema em cada país.

No entanto, mesmo em países desenvolvidos, ainda são enviadas quantidades expressivas de resíduos para descarte nos aterros sanitários. Em 2011 os EUA destinaram cerca de 134 milhões de toneladas aos aterros sanitários representando 53%

da geração e em 2014 a UE descartou cerca de 66 milhões de toneladas, que representa 27,5% da geração total (EPA, 2011; EUROSTAT, 2014).

Dentre as formas de tratamento e recuperação de valor do RSU – reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética – pode-se considerar que o processo de combustão com recuperação energética se destaca pela sua flexibilidade em processar resíduos de vários tipos que podem estar misturados. Desta forma, esta alternativa é a mais favorável à redução do envio de resíduos para descarte em aterros sanitários em relação às demais alternativas (EPA, 1974; Stehlík *et al.*, 2012).

Uma questão relevante para viabilização do processo de combustão com recuperação energética é o poder calorífico do material (IBAM, 2001; Brizio & Genon, 2008). Levando em consideração as características dos países em desenvolvimento, com quantidade expressiva de resíduos orgânicos (Zhang *et al.*, 2010), o modelo de combustão com recuperação energética que parece ter maior potencial de aplicação é o coprocessamento, já que nas demais formas de combustão com recuperação energética têm-se a necessidade de complemento com fontes primárias de energia ou resíduos com poder calorífico equivalente daqueles que alimentava os fornos originalmente (ABRELPE & ISWA, 2013).

O coprocessamento é o uso de resíduos como combustível ou matéria-prima em substituição aos recursos minerais naturais e combustíveis fósseis, geralmente em indústrias com utilização intensa de energia, como indústria de cimento, aço e vidro (EUBIONET, 2003; IPTS, 2003; CNI-ABCP, 2012; Murtz & Morf, 2007).

Dentro dos temas de gestão de resíduos e logística reversa, encontram-se na literatura diversos estudos abordando a estruturação do sistema do RSU. Porém os trabalhos desenvolvidos até então tem diversos focos e são específicos para cada estudo de caso.

Dessa forma, este artigo utiliza a revisão bibliográfica narrativa para avaliar as técnicas de modelagem e os métodos utilizados na literatura para a resolução de problemas similares. E assim, definir um potencial modelo matemático genérico de otimização para estruturação do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento, que suporte a implantação deste sistema em diversos casos.

A partir desta introdução, este artigo se divide em cinco seções. A Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre o sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento. A Seção 3 apresenta a revisão bibliográfica narrativa. Os resultados obtidos com a revisão bibliográfica narrativa são descritos na Seção 4. Na Seção 5 é proposto o modelo matemático como contribuição principal deste trabalho. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A logística reversa associada a geração de resíduo sólido é apresentada na literatura acadêmica em dois campos de estudo, o da logística reversa e o da gestão de resíduos. Estes dois campos de estudo são convergentes, porém verifica-se falta de integração e sintetização dos conceitos a eles relacionados.

Na logística reversa, independente do produto ou resíduo, observa-se quatro atividades que fazem parte de qualquer sistema: coleta, inspeção, triagem e destinação. Os métodos de valorização podem ser em níveis variados: nível do produto (reparo), nível de módulos (remodelagem), nível de componente (remanufatura), nível de peça a parte (recuperação), nível de material (reciclagem) e nível energético (incineração). Nos casos em que não há mais possibilidade de valorização, estes são encaminhados para o descarte, usualmente nos aterros sanitários (De Brito & Dekker, 2003; Rogers & Tibben-Lembke, 1998; Mckinnon *et al.*, 2010; e Thierry *et al.*, 1995).

Para a utilização do RSU como combustível alternativo, em um processo de combustão, não é possível encaminhá-lo para os fornos industriais diretamente da forma como é coletado após o descarte. É necessário passar por um processo de tratamento para transformá-lo em um *refuse derived fuel* (RDF).

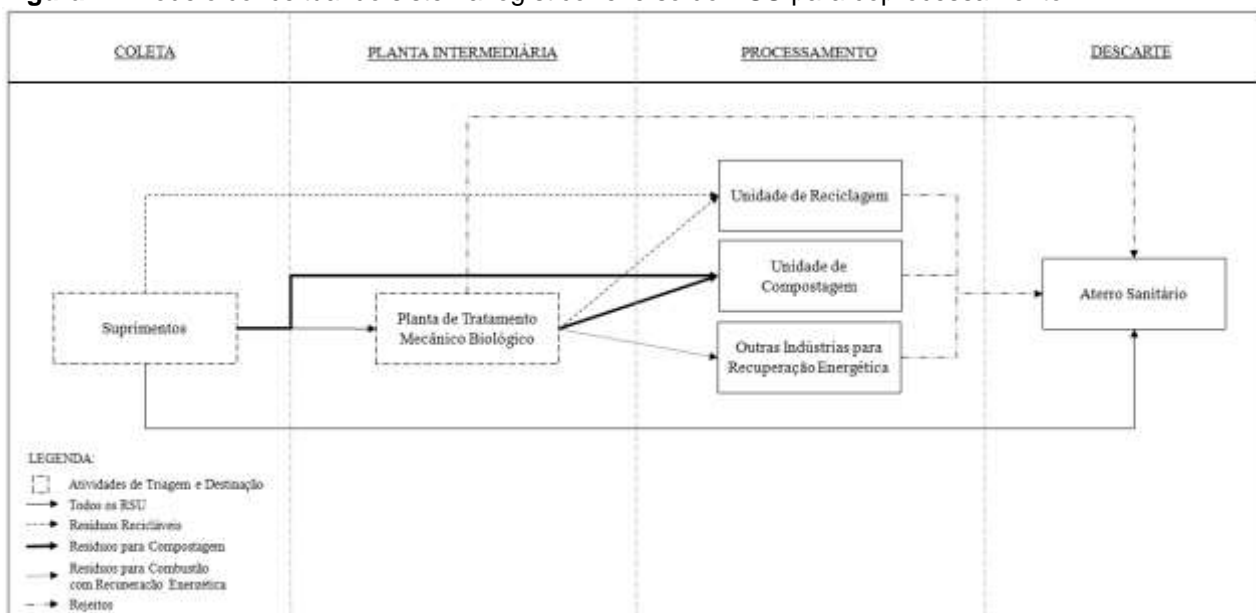
Para obtenção do RDF, o RSU precisa passar por uma série de processos de triagem e separação de materiais não combustíveis como vidro, materiais ferrosos e areia. Além disso, deve-se passar por diminuição de granulometria até chegar a composição necessária para a utilização nas indústrias (Gendebien *et al.*, 2003; Hale & Miranda, 1997).

Akasaka & D'Agosto (2015) fazem uma avaliação de 43 artigos onde se estrutura e/ou descreve o sistema logístico reverso do RSU. Dentre eles, seis estudos apresentam sistemas com a produção de RDF. Três artigos evidenciam o processamento por meio da planta de tratamento mecânico biológico (planta TMB) - Feo & Malvano (2009), Pires *et al.* (2011) e Mavrotas *et al.* (2013). Dois artigos descrevem o processo da planta TMB, porém sem denominação do mesmo - Robba *et al.* (2008) e Ravindra *et al.* (2015). Por último, Erkut *et al.* (2008) analisa o sistema com a produção de RDF, porém sem especificar e nem detalhar o processo. Assim, entende-se que a planta TMB parece possuir o processo mais comum de transformação do RSU em RDF.

Dessa forma, levando em consideração o modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU apresentado por Akasaka & D'Agosto (2015), elabora-se o sistema onde o RSU é destinado ao coprocessamento, exposto na Figura 1.

Uma diferença da proposta de Akasaka & D'Agosto (2015) para o modelo apresentado na Figura 1 é a definição da planta intermediária como planta TMB, que antes estava representada como estação de transferência de forma genérica. Além disso, a planta TMB direciona o método de valorização dos resíduos na combustão com recuperação energética para o coprocessamento em outras indústrias diversas, eliminando a possibilidade de destinação para as demais usinas de combustão.

**Figura 1 - Modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento**



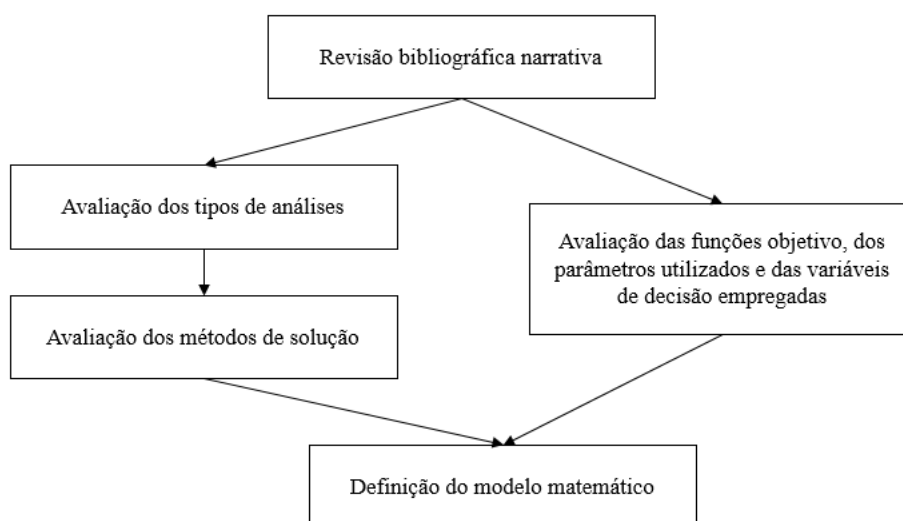
**Fonte:** Akasaka & D'Agosto (2015), adaptado

A partir do estabelecimento do modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento, percebe-se a necessidade de uma planta intermediária, no caso a planta TMB, para a viabilização do processo. Dessa forma, entende-se que o modelo de otimização para a estruturação deste sistema requer a definição da localização desta planta, assim como a alocação da oferta de resíduos.

### 3 METODOLOGIA

Para a definição de um modelo matemático genérico da estruturação do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento, utiliza-se como metodologia a revisão bibliográfica narrativa. A partir da revisão três avaliações são realizadas, apresentadas na Figura 2.

**Figura 2 - Metodologia do trabalho**



**Fonte:** Elaboração própria

Avaliam-se os tipos de análises realizadas e os métodos de solução utilizados na literatura para a estruturação do sistema logístico reverso do RSU. Além disso, avaliam-se os parâmetros utilizados, variáveis de decisão e as funções objetivo empregados para a resolução dos problemas. As avaliações destes itens norteiam o desenvolvimento e definição do modelo matemático deste trabalho.

Na revisão bibliográfica narrativa seleciona-se artigos que estruturam o sistema logístico reverso do RSU no Brasil, Estados Unidos, Canadá, México, União Europeia, China e Índia. Os estudos foram selecionados em função da sua data de publicação, considerando os últimos 10 anos.

Foram selecionados 33 artigos acadêmicos e sintetizados na Tabela 1, descrevendo as suas funções objetivo, parâmetros de decisão e tipos de modelos matemáticos utilizados. Além disso, apresenta-se também na Tabela 1 os artigos classificados pelo tipo de análise, utilizando as mesmas categorias na revisão bibliográfica realizada por Morrissey & Browne (2004): *cost-benefit analysis* (CBA), tomada de decisão multicritério e *life cycle assessment* (LCA).

Ainda, quando a análise é relacionada a tomada de decisão multicritério, classifica-se também como um problema de tomada de decisão multiobjetivo (sigla em inglês MODM - *multi-objective decision making*) ou problema de tomada de decisão multiatributo (sigla em inglês MADM - *multi-attribute decision making*). Assim, com a metodologia definida, procede-se a fase de análise (Seção 4) para auxiliar na definição do modelo matemático.

**Tabela 1** - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU

(continua)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Chang & Davila, 2007	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional - Custo de descarte - Renda na venda de energia	<i>Minimax regret integer programming model</i>	Análise de dois cenários futuros: - Aumento dramático do valor do diesel; - Fechamento de um dos aterros sanitários. Utilização do LINDO. Período de análise de 4 anos.
China	Hong-tao <i>et al.</i> , 2007	Tomada de decisão multicritério	MADM	Minimização do custo  Minimização do impacto ambiental	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de energia  - Tratamento de lixivia-dos - Elementos CHONS	<i>Monte-Carlo model:</i> - <i>analytic utility process</i> - <i>analytic hierarchy process</i> - <i>analytic uncertainty process</i> - <i>analytic information integration process</i>	Simulação de três cenários: - Cenário com condições normais; - Cenário com alto valor de descarte; - Cenário com coleta seletiva.
Canadá	Yeomans, 2007	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e recicláveis	<i>Grey programming (GP)</i> <i>Evolutionary simulation-optimization (ESO)</i>	
Grécia	Erkut <i>et al.</i> , 2008	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização da emissão de GEE  Minimização do descarte  Maximização do processamento  Maximização da recuperação energética	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional  - Emissão de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CFCs das plantas de processamento  - Quantidade de resíduo para descarte no aterro sanitário  - Quantidade de resíduos para processamento  - Quantidade de resíduos para recuperação energética	Programação linear inteira mista MiniMax lexicográfico	Utilização de CPLEX 8.1.

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Canadá	Li <i>et al.</i> , 2008	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de composto orgânico e resíduos recicláveis - Custo de descarte	<i>Integrated two-stage optimization model</i> ): - <i>Two-stage stochastic programming</i> - <i>Interval mathematical programming</i> - <i>Integer programming</i>	Período de análise: 25 anos.
Itália	Robba <i>et al.</i> , 2008	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização do resíduo não reciclável Minimização do descarte  Minimização do impacto ambiental	- Custo da reciclagem - Custo de manutenção - Renda na venda de RDF e energia - Quantidade de resíduos não recicláveis - Quantidade de resíduo para descarte no aterro - Emissão de gases	<i>Nonlinear optimization model</i> <i>Reference point method</i>	Utilização do software LINGO.
China	Su <i>et al.</i> , 2008	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo do tratamento de lixiviados - Custo do tratamento de gases - Custo de tratamento de cinzas na combustão	<i>Interval-parameter linear dynamic programming (ILDPA)</i> <i>e-constraint method</i>	Utilização do software LINGO. Período de análise: 15 anos.
Croácia	Vego <i>et al.</i> , 2008	Tomada de decisão multicritério	MADM	Ecológico  Econômico  Social  Funcional	- relacionado à distância - relacionado à localização - Custo de investimento - Custo operacional - relacionado à localização - Viabilidade geral - Recursos existentes	<i>PROMETHEE method</i> <i>GAIA method</i>	

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Itália	Feo & Malvano, 2009	<i>Life cycle assessment (LCA)</i>	-	Impacto ambiental	- Consumo de energia RENOV e não-RENOV - Consumo de água - Extração de minerais - Emissão de GEE - Acidificação - Eutroficação - Resíduos perigosos e não-perigosos	<i>Life cycle assessment</i>	
China	Huang <i>et al.</i> , 2009_a	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de energia	<i>Inexact chance-constrained linear programming model</i> <i>Stochastic robust chance-constrained programming</i>	Comparação de dois modelos: ICCLP e SRCCP. Período de análise: 15 anos.
China	Huang <i>et al.</i> , 2009_b	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e composto orgânico	<i>Interval-parameter two-stage chance-constraint mixed integer linear programming (ITCMILP)</i>	Avaliação de três cenários: - Expansão das plantas; - EVU do aterro em 3 anos; - EVU do aterro em 8 anos. Período de análise: 15 anos.
Espanha	Aragónes-Beltrán <i>et al.</i> , 2010	Tomada de decisão multicritério	MADM	Minimização do risco de inundação Maximização das distâncias  Minimização das distâncias  Planos de uso do solo	- Risco de inundação por localização Distância das: - plantas em relação às cidades - plantas em relação às áreas protegidas - plantas em relação às rodovias - plantas em relação aos parques industriais - De acordo com o plano de uso do solo	<i>Analytic Hierarchic Process (AHP)</i> <i>Analytic Network Process (ANP)</i>	Utilização do software Super Decisions v1.6.0. e Superdecisions-Q.



**Tabela 1** - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Espanha	Bovea <i>et al.</i> , 2010	<i>Life cycle assessment</i> (LCA)	-	Impacto ambiental	- Impacto causado pelo uso de sacos e vasilhas na coleta - Consumo de energia - Consumo de COMB	<i>Life cycle assessment</i> <i>Life cycle inventory</i>	Utilização do software Sima-Pro7.
Itália	Galante <i>et al.</i> , 2010	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização do impacto ambiental	- Custo de investimento - Custo operacional da estação de TRANSF - Custo de transporte - Consumo de COMB - Custo do COMB	Programação linear inteira mista <i>Fuzzy Procedure</i> <i>Goal programming</i> <i>Weighted sum method</i>	Utilização de CPLEX 8.0 e ARCmap 8.1.
China	Huang <i>et al.</i> , 2010	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e composto orgânico	<i>Inexact two-stage chance-constrained linear programming</i> (ITCLP) <i>Interval quadratic programming</i> (IQP)	Período de análise: 15 anos.
China	Su <i>et al.</i> , 2010	Tomada de decisão multicritério	MODM e MADM	Minimização do custo  Maximização da vida útil do aterro Maximização de resíduos valorizados  Maximização da satisfação do público	- Custo operacional - Custo de transporte - Custo de expansão - Renda na venda de energia e composto orgânico - Vida útil do aterro  - Quantidade de resíduo valorizados na compostagem e recuperação energética - Nível de satisfação do público	<i>Inexact chance-constrained mixed-integer linear programming</i> <i>Fuzzy decision model</i> <i>Weighted sum method</i> <i>Weighted product method</i> <i>TOPSIS</i>	Análise de três cenários: - Situação atual; - Balanço entre situação atual e planejamento de longo prazo com taxa média de processamento; - Planejamento de longo prazo com taxa alta de processamento. Comparação entre os métodos de SWA, WP e TOPSIS. Período de análise: 15 anos.
China	Chen & Li, 2011	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de composto orgânico	<i>Fuzzy-stochastic-interval linear programming method</i> <i>Nguyen's method</i>	Período de análise: 5 anos.

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Canadá	Huang <i>et al.</i> , 2011	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo do estoque - Custo de transporte - Custo de descarte	<i>Piecewise interval linear programming</i>	
Canadá	Huang & Zhu, 2011	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de CORG e resíduo reciclável	<i>Stochastic linear fractional programming (SLFP)</i>	Período de análise: 15 anos.
China	Li <i>et al.</i> , 2011_a	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de investimento - Renda na venda de CORG e energia	<i>Two-stage support-vector-regression optimization model: - Support-vector-regression model - Interval-parameter mixed integer linear programming</i>	Período de análise: 5 anos.
China	Li <i>et al.</i> , 2011_b	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional - Renda na venda de energia e resíduos recicláveis	<i>Interval e parameter programming (IPP) Minimax regret analysis (MMR)</i>	Período de análise: 15 anos.
Portugal	Pires <i>et al.</i> , 2011	Tomada de decisão multicritério	MADM	Ambiental  Técnico Custo  Social	- Acidificação - Eutroficação - Emissão de GEE - Oxidação fotoquímica - Consumo de energia - VU do aterro sanitário - Custo de investimento - Custo operacional - Renda da venda de recicláveis, energia e CORG - Custo de transporte - Odor - Taxa paga pela população - Eficiência econômica	<i>Analytic hierarchy process (AHP) Technique for order performance by similarity to ideal solution (TOPSIS)</i>	

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Chang <i>et al.</i> , 2012	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment</i> (LCA)	MODM	Minimização do custo Maximização do benefício econômico  Minimização de GEE	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de resíduo recicláveis e energia - Tarifa para coleta de resíduo - Custo operacional e de transporte para envio dos recicláveis valorizados para o mercado consumidor - Emissão no transporte - Emissão nas plantas	Programação linear <i>Compromise-programming model</i> <i>Life cycle assessment</i>	Avaliação em 5 cenários: - Minimização do custo; - Minimização do benefício econômico; - Minimização de GEE; - Minimização do benefício econômico e GEE; - Minimização do benefício econômico de acordo com a regulação ambiental de carbono. Utilização do software GaBi e LINGO.
China	Lu <i>et al.</i> , 2012	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de expansão das plantas - Renda na venda energia	<i>Inexact two-phase fuzzy programming</i> <i>Mixed-integer programming and interval-parameter programming</i>	Período de análise: 15 anos.
Canadá	Huang <i>et al.</i> , 2012	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda energia e composto orgânico - Custo para expansão das plantas	<i>Interval-valued fuzzy-stochastic programming</i> <i>Infinite <math>\alpha</math>-cuts method</i>	Período de análise: 15 anos.
Índia	Srivastava & Nema, 2012	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização do impacto ambiental	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de investimento - Emissão de gases - Emissão de lixiviados	<i>Fuzzy parametric programming model</i> <i>Weighted sum method</i>	Período de análise: 17 anos. Avaliação em 3 cenários: - 100% do peso no custo - 50% no custo e 50% no risco ambiental - 100% no risco ambiental
Grécia	Komilis & Minoglou, 2013	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização da emissão de GEE	- Custo operacional - Custo de investimento - Emissão nas plantas	<i>Non-linear mathematical model</i> <i>e-constraint method</i>	Utilização do software Opt-Quest.

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(continuação)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Levis <i>et al.</i> , 2013	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment (LCA)</i>	-	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de investimento - Custo operacional - Emissão de gases - Consumo de combustível - Consumo de energia elétrica	<i>Non-linear optimization model</i> <i>Life cycle assessment</i>	Período de análise: 30 anos.
Grécia	Mavrotas <i>et al.</i> , 2013	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização do impacto ambiental	- Custo operacional da coleta PEV - Custo de transporte - Renda na venda de resíduo recicláveis e energia - Emissão de GEE (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) - Emissão de poluentes (NH <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , NMVOC)	<i>Mixed integer linear programming model</i> <i>e-constraint method</i>	Avaliação em 4 cenários com melhoria progressiva no processo de valorização do resíduo. Período de análise: 20 anos. Utilização do GAMS. Utilização de CPLEX 12.2.
China	Zhang & Huang, 2013	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo  Minimização da emissão de GEE	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia - Custo de investimento - Emissão de GEE nas plantas	<i>Dynamic stochastic possibilistic multiobjective programming (DSPMP)</i> <i>e-constraint method</i>	Período de análise: 15 anos. Avaliação em três cenários: - Considerando as duas funções objetivo; - Considerando apenas a função de custo incluindo a função de emissão do GEE como restrição com os limites de cada planta; - Considerando apenas a função de custo.
Espanha	Fernández-Nava <i>et al.</i> , 2014	<i>Life cycle assessment (LCA)</i>	-	Impacto ambiental	- Consumo de energia - Consumo de combustível - Consumo de água - Consumo de reagentes químicos - Emissão de biogás	<i>Life cycle assessment</i>	Análise de 5 cenários. Utilização do software SimaPro.

**Tabela 1 - Modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU**

(conclusão)

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Modelo / Método Matemático	Observação
China	Chi <i>et al.</i> , 2014	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment (LCA)</i>	MADM	Eficiência energética  Impacto ambiental  Econômico	- Consumo de energia - Renda na venda de energia - Consumo de comb. fóssil - Uso do solo - Acidificação - <i>Ecotoxicity</i> - GEE - <i>Organic and inorganic respiratory</i> - Custo de investimento - Custo operacional - Renda na venda de energia	<i>Life cycle assessment</i> <i>Life cycle cost</i> <i>TOPSIS</i> <i>AHP</i>	Período de análise: 30 anos. Utilização do software GaBi.
China	Zhang <i>et al.</i> , 2014	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de descarte - Custo de transporte - Custo de armazenamento	<i>Stochastic programming method</i> <i>Linear chance-constrained programming model</i>	

Legenda: DIST – Distância; RENOV – Renovável; GEE – Gases de efeito estufa; EVU – Extensão da vida útil; VU – Vida útil; TRANSF – Transferência; COMB – Combustível; CORG – Composto orgânico; PEV – Ponto de entrega voluntário.

**Fonte:** Elaboração Própria

## 4 ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Tipos de análise

Os 33 artigos avaliados (Tabela 1) foram classificados em três tipos de análise: 14 utilizam o CBA como método de análise, 13 apresentam análises de tomada de decisão multicritério, 3 artigos apresentam LCA e 3 integram a tomada de decisão multicritério com o LCA.

O CBA é um modelo que transforma todos os parâmetros de decisão em termos monetários. Apesar da ocorrência mais frequente desta análise na revisão bibliográfica realizada, Morrissey & Browne (2004) indicam que o CBA não é o tipo de análise mais adequado para decisões que envolvem interesses de diferentes grupos e objetivos diversos, como na gestão do RSU.

O LCA é uma técnica de análise de potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, identificando, quantificando e avaliando todos os recursos utilizados, bem como todas as emissões e resíduos liberados (Feo & Malvano, 2009).

Já a análise de tomada de decisão multicritério é utilizada para a tomada de decisões com parâmetros diversos que levam em consideração diferentes categorias de critérios, conflitantes ou não e, dependendo do método utilizado, podem incorporar parâmetros quantitativos e qualitativos (Morrissey & Browne, 2004).

Para que a solução apresentada para a gestão de RSU seja ambientalmente e socialmente sustentável e em prol da sociedade presente e futura, entende-se que a estruturação desse sistema deve considerar não apenas questões relacionadas à viabilidade econômica, cabendo também a integração de parâmetros ambientais e/ou sociais para a tomada de decisão.

Além disso, tendo em vista a necessidade de resolução do problema de localização-alocação da planta TMB para a estruturação deste sistema, a tomada de decisão multicritério parece ser o método de análise que melhor se encaixa neste estudo. Os demais tipos de análise – CBA e LCA – não solucionam o objetivo deste trabalho.

### 4.2 Método de solução

De acordo com Farahani *et al.* (2010), o problema de tomada de decisão multicritério pode ser de dois tipos: problema de tomada de decisão multiobjetivo (MODM – sigla em inglês) e problema de tomada de decisão multiatributo (MADM – sigla em inglês).

O MADM possui um número limitado de alternativas ou cenários pré-determinados em que cada uma apresenta um nível específico de alcance do objetivo, sendo o resultado a escolha da melhor alternativa entre elas. Esta lógica pode ser observada nos trabalhos de Hong-tao *et al.* (2007), Vego *et al.* (2008), Aragónes-Beltrán *et al.* (2010), Su *et al.* (2010), Pires *et al.* (2011) e Chi *et al.* (2014).

Já o MODM desenha a melhor alternativa considerando várias interações dentre as restrições que mais satisfazem o conjunto de objetivos. Modelos com abordagem exata como de Erkut *et al.* (2008), Robba *et al.* (2008), Su *et al.* (2008), Galante *et al.* (2010), Su *et al.* (2010), Srivastava & Nema (2012), Komilis & Minoglou (2013), Mavrotas *et al.* (2013) Zhang & Huang (2013) são exemplos para a estruturação do sistema logístico reverso do RSU. O problema de localização-alocação deste trabalho será definido através do MODM, em que as definições dos múltiplos objetivos apresentam-se na próxima subseção.

Um problema multiobjetivo divide-se em duas etapas: a busca de solução realizada pelo método escolhido e a tomada de decisão da solução preferida, quando se necessita do apoio do agente decisor. A primeira etapa corresponde à busca de soluções na região factível em direção à fronteira de Pareto, e a segunda etapa corresponde a alocação do critério de preferência para determinar qual das opções dentro do conjunto Pareto ótimo deve ser eleita para ser implantada (Garcia, 2005 e Farahani *et al.*, 2010).

Na Tabela 2 apresentam-se os artigos encontrados na revisão bibliográfica que utilizam a tomada de decisão multiobjetivo com a discriminação das duas etapas do problema. Os métodos de busca das soluções são baseados em programação linear e não linear, com diversas possibilidades de variações dependendo da decisão a ser tomada. Para a tomada de decisão sobre o problema de localização-alocação, o método mais utilizado é baseado em programação linear inteira mista (PLIM) em que se caracteriza por ter variáveis de decisão com valores inteiros e contínuos, além de funções lineares.

Os métodos para a tomada de decisão da solução preferida podem ser de diversos tipos. Na revisão bibliográfica apresentam-se os seguintes: *MiniMax lexicográfico*, *reference point method*, *e-constraint method*, *goal programming*, *weighted sum method* e *weighted product method*.

O método *e-constraint*, que se apresenta em maior quantidade na literatura, transforma as funções objetivo em restrições com valores específicos (*e*), mantendo apenas uma função objetivo de maior importância. As funções objetivo que se tornaram restrições limitam o espaço factível de soluções. Esta técnica permite gerar o conjunto Pareto ótimo mesmo em espaços não convexos. A desvantagem deste método é a grande dependência do resultado na escolha dos valores das restrições das funções objetivo, ou seja, dos limitantes. Dessa forma, os limitantes devem ser escolhidos de modo que fique entre os valores mínimos e máximos de cada função objetivo (Deb, 2001).

**Tabela 2** - Métodos utilizados para tomada de decisão multiobjetivo (MODM)

Referência Bibliográfica	Modelo de Busca da Solução	Modelo de Tomada de Decisão da Solução Preferida	Modelos Utilizados para Outras Análises
Erkut <i>et al.</i> , 2008	Programação linear inteira mista	MiniMax lexicográfico	
Robba <i>et al.</i> , 2008	<i>Nonlinear optimization model</i>	<i>Reference point method</i>	
Su <i>et al.</i> , 2008	<i>Interval-parameter linear dynamic programming</i>	<i>e-constraint method</i>	
Galante <i>et al.</i> , 2010	Programação linear inteira mista	<i>Goal programming</i> <i>Weighted sum method</i>	<i>Fuzzy Procedure</i>
Su <i>et al.</i> , 2010	<i>Inexact chance-constrained mixed-integer linear programming</i>	<i>Weighted sum method</i> <i>Weighted product method</i>	<i>Fuzzy decision model</i> TOPSIS
Srivastava & Nema, 2012	<i>Fuzzy parametric programming model</i>	<i>Weighted sum method</i>	
Komilis & Minoglou, 2013	<i>Non-linear mathematical model</i>	<i>e-constraint method</i>	
Mavrotas <i>et al.</i> , 2013	Programação linear inteira mista	<i>e-constraint method</i>	
Zhang & Huang, 2013	<i>Dynamic stochastic possibilistic multiobjective programming</i>	<i>e-constraint method</i>	

Fonte: Elaboração Própria

Na estruturação do sistema logístico reverso do RSU sendo um objeto de estudo que envolve múltiplos decisores e tendo que atender a objetivos com enfoque diversos, pode ser útil optar por um método de solução com menos interação possível de um tomador de decisão, que pode ser tendenciosa e subjetiva. Dessa forma, o problema de localização-alocação de facilidade multiobjetivo deste trabalho será modelado por meio de programação linear inteira mista com utilização do método *e-constraint*.

### 4.3 Funções Objetivo e Parâmetros de Decisão

Após a definição do tipo de modelo e do método de solução a serem utilizados, esta seção apresenta e analisa as funções objetivo e os parâmetros de decisão apresentados na revisão bibliográfica, que estão organizados na Tabela 3.



**Tabela 3** - Relação das funções objetivo e parâmetros de decisão

<b>Função Objetivo</b>	<b>Parâmetros de Decisão</b>	<b>Artigos Relacionados</b>
Minimização de custo e Maximização dos benefícios	Custo operacional	29
	Custo de transporte	24
	Renda na venda de resíduos processados e energia	21
	Custo de investimento	15
	Custo de descarte	4
	Outros parâmetros econômicos	5
Minimização do impacto ambiental	Emissão de GEE	13
	Consumo de energia	6
	Consumo de combustível	5
	Problemas relacionados à localização	3
	Acidificação	3
	Emissão de lixiviados	3
	Consumo de água	2
	Outros parâmetros ambientais	13
Maximização dos resíduos valorizados, Maximização da vida útil dos aterros e Minimização do descarte <sup>1</sup>	Quantidade de resíduos valorizados	4
	Quantidade de resíduos para descarte	4
Maximização ou minimização dos parâmetros funcionais	Parâmetros funcionais <sup>2</sup>	6
Minimização do impacto social	Uso do solo	2
	Outros parâmetros sociais <sup>3</sup>	4

Nota<sup>1</sup>: O parâmetro de decisão de “quantidade de resíduos para descarte” é relacionado as funções objetivo de “minimização do descarte” e “maximização da vida útil dos aterros”.

Nota<sup>2</sup>: Recursos existentes e viabilidade geral.

Nota<sup>3</sup>: Taxa paga pela população, odor, nível de satisfação da população e problemas relacionados à localização.

**Fonte:** Elaboração Própria

Percebe-se que as funções relacionadas à minimização de custo e maximização dos benefícios são as que aparecem de forma predominante, seguido das funções objetivo que buscam minimizar os impactos ambientais, destacando os parâmetros de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e consumo de energia, sendo o consumo de combustível uma das suas formas.

A decisão sobre a valorização do resíduo e o descarte no aterro sanitário vem como a terceira função objetivo mais utilizada podendo ser definida também como maximização dos resíduos processados, minimização do descarte ou maximização da vida útil do aterro sanitário. Além disso, são abordados também parâmetros sociais e os funcionais ou técnicos, porém de forma menos recorrente na literatura.

Para a formulação do problema deste trabalho utilizam-se as quatro principais funções objetivo apresentados na literatura e os respectivos parâmetros de maior representatividade. De maneira específica, este trabalho considera então as seguintes funções objetivo:

- Minimização de custo integrando os parâmetros de custo de transporte, custo de investimento e operacional da planta TMB, custo de descarte e o valor do combustível fóssil (CF) a ser substituído pelo RDF;
- Minimização da emissão de GEE que integra os parâmetros de emissão na atividade de transporte, no aterro sanitário e na indústria que utilizará o RDF;
- Minimização do consumo de energia/combustível proveniente do CF na atividade de transporte e na indústria; e
- Minimização do descarte de RSU no aterro sanitário.

Desta forma, a partir da definição do método de resolução do problema e das funções objetivo e de seus respectivos parâmetros, formula-se a seguir o modelo matemático do problema.

## 5 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Nesta seção formula-se o modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento que contempla as quatro funções objetivo que tem como parâmetros aspectos econômicos e ambientais.

### 5.1 Funções Objetivo

As funções objetivo deste trabalho estão representadas abaixo.

Função Multiobjetivo:

$$\text{Minimizar } F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo:

$$F_1 = CTrans + CI + COper + CDat - VCf \quad (1a)$$

$$F_2 = GEETrans + GEEAter - GEEInd \quad (1b)$$

$$F_3 = ETrans - EInd \quad (1c)$$

$$F_4 = DesAter \quad (1d)$$

A primeira função objetivo (1a) consiste nos parâmetros econômicos, que contemplam os parâmetros de custo de transporte ( $CTrans$ ), custo de investimento na planta TMB ( $CI$ ), custo operacional da planta TMB ( $COper$ ), custo de descarte no

aterro sanitário (*CDat*) e o valor do combustível fóssil (*VCf*), sendo o valor do CF correspondente ao valor de ganho pela sua substituição. Dessa forma, este custo será subtraído da equação da função objetivo.

As três funções objetivos seguintes (1b, 1c e 1d) representam a abordagem ambiental. A segunda função objetivo (1b) refere-se à emissão de GEE no transporte (*GEETrans*), no descarte (*GEEAter*) e na indústria (*GEEInd*). O *GEEInd* corresponde a emissão do GEE não produzida pelo CF com a substituição pelo RDF, entrando de forma a subtrair na equação da função objetivo.

A terceira função (1c) contempla o consumo energético do combustível fóssil na atividade de transporte (*ETrans*) e a diminuição de consumo deste recurso na indústria (*EInd*), subtraindo na equação da função objetivo.

A quarta e última função objetivo (1d) representa a quantidade de descarte do RSU no aterro sanitário (*DesAter*). Com isso, detalha-se a seguir cada parâmetro e os elementos econômico e ambiental citados anteriormente.

## 5.2 Conjuntos, Variáveis de Decisão e Detalhamento das Funções Objetivo

Diante do modelo do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento apresentado na Figura 1, considera-se os seguintes conjuntos:

- *I*: conjunto formado por locais de suprimentos da atividade de coleta;
- *II*: conjunto formado por locais candidatos a receberem uma planta TMB;
- *P*: conjunto formado por plantas da atividade de processamento;
- *V*: conjunto de tipologias para as plantas de processamento. Esse conjunto é composto dos elementos 1, 2 e 3, sendo que o valor 1 indica unidade de reciclagem, o valor 2 indica unidade de compostagem, e o valor 3 indica indústria para combustão com recuperação energética; e
- *T*: conjunto formado por aterros sanitários para a atividade de descarte.

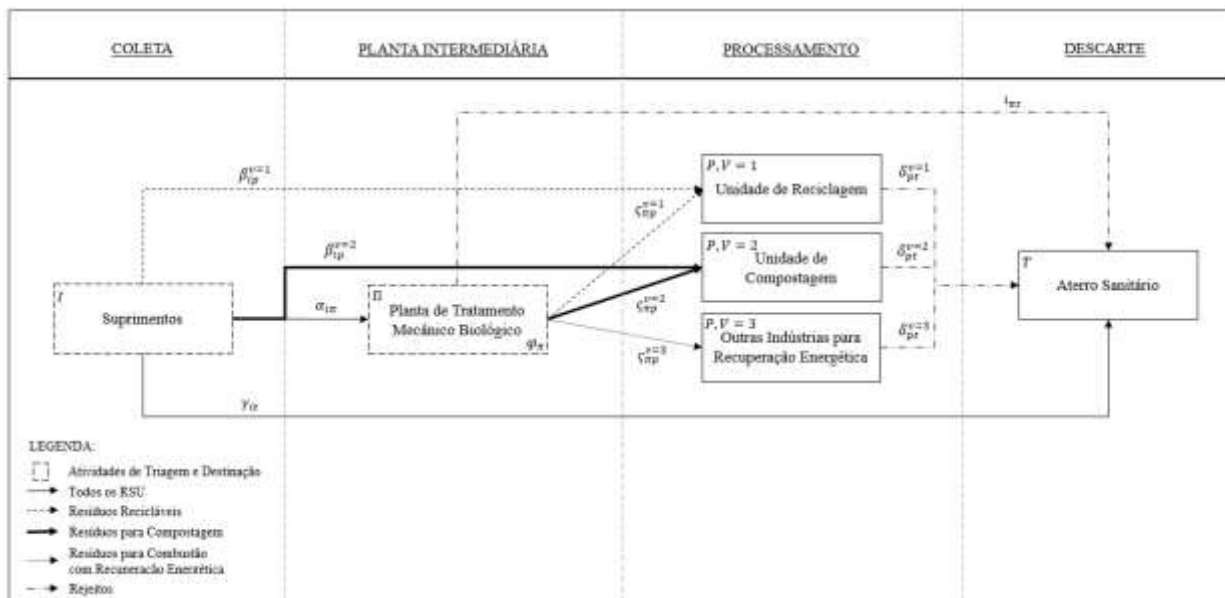
Os arcos da Figura 1 representam as atividades de transporte. Cada um possui um local de origem e um de destino, denominados nós, que por sua vez são fixos e pré-determinados, inclusive as potenciais localizações da planta TMB. A Tabela 4 apresenta as variáveis de decisão que apoiam na formulação das equações, também exibidas na Figura 3.

**Tabela 4** - Notações das variáveis de decisão utilizado para formulação do modelo

Referência de Destinação	Notação	Detalhamento
Planta TMB	$\varphi_{\pi}$	Variável binária (0,1) para localizar a planta TMB na localidade $\pi \in \Pi$ .
	$\alpha_{i\pi}$	Variável que representa a quantidade do resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ e transportado para a planta TMB $\pi \in \Pi$ .
Planta de Processamento	$\beta_{ip}^v$	Variável que representa a quantidade de resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ para a planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$ .
	$\zeta_{\pi p}^v$	Variável que representa a quantidade de resíduo (em t/dia) da planta TMB da localidade $\pi \in \Pi$ para a planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$ .
Descarte	$\gamma_{it}$	Variável que indica a quantidade do resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ e transportado para o aterro sanitário $t \in T$ .
	$l_{\pi t}$	Variável que indica a quantidade de rejeito (em t/dia) da planta TMB $\pi \in \Pi$ para o aterro sanitário $t \in T$ .
	$\delta_{pt}^v$	Variável que indica a quantidade de rejeito (em t/dia) da planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$ para o aterro sanitário $t \in T$ .

Fonte: Elaboração Própria

**Figura 3** - Sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento com as respectivas variáveis de decisão



Fonte: Elaboração Própria

A seguir detalha-se cada elemento das funções objetivo.

### Custo de transporte – CTrans

O CTrans é o somatório do produto do custo unitário de transporte (R\$/t) presente em cada arco pela quantidade de resíduos (t/dia) que trafega por ele. O resultado desta equação é o custo de transporte definido em (2).

$$CTrans = \sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} CVtp_{i\pi} \alpha_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} CVtp_{\pi p} \zeta_{\pi p}^v + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} CVtp_{ip} \beta_{ip}^v + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CVtp_{it} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} CVtp_{\pi t} \iota_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CVtp_{pt} \delta_{pt}^v \quad (2)$$

Sendo:

- $CVtp_{ab}$ : Custo unitário de transporte (em R\$/t) da origem  $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$  para o destino  $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$ .

### Custo de investimento na planta TMB – CI

O CI é o somatório do custo de investimento (R\$/dia) na abertura da planta TMB conforme (3).

$$CI = \sum_{\pi \in \Pi} CF_{\pi} \varphi_{\pi} \quad (3)$$

Sendo:

- $CF_{\pi}$ : Custo do investimento (em R\$/dia) da planta TMB localizada em  $\pi \in \Pi$ .

### Custo operacional da planta TMB – COper

O COper é o somatório do produto do custo de operação unitário (R\$/t) da planta TMB aberta conforme resultado do modelo pela quantidade de resíduos (t/dia) processados na planta TMB. O resultado desta equação é o custo operacional da planta TMB em R\$/dia conforme (4).

$$COper = \sum_{\pi \in \Pi} CVpl_{\pi} (\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi}) \varphi_{\pi} \quad (4)$$

Sendo:

- $CVpl_{\pi}$ : Custo operacional (em R\$/t) da planta TMB localizada em  $\pi \in \Pi$ .

### Custo de descarte no aterro sanitário – CDat

O CDat é o somatório do produto do custo unitário de descarte no aterro (R\$/t) com a quantidade de resíduos e/ou rejeitos (t/dia) que trafegam em cada arco destinado ao aterro sanitário. O resultado é o custo de descarte em R\$/dia definido em (5).

$$CDat = \sum_{t \in T} (\sum_{i \in I} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \iota_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \delta_{pt}^v) CDat_t \quad (5)$$

Sendo:

- $CDat_t$ : Custo de descarte (em R\$/t) no aterro sanitário  $t \in T$ .

### Valor do combustível fóssil – VCf

O VCf é o somatório do produto do custo unitário do combustível fóssil (R\$/t) com a quantidade de RDF (t/dia) entregue na indústria. Para o custo do combustível fóssil deve-se levar em consideração a diferença do poder calorífico do RDF em relação ao CF. Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB para a transformação do RSU em RDF. O resultado fornece o valor do CF em R\$/dia, que entrará como ganho na função objetivo, conforme definido em (6).

$$VCf = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (CCF_p^{v=3} PC_{RDF/CF}) (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) \quad (6)$$

Sendo:

- $CCF_p^{v=3}$ : Custo do combustível fóssil (em R\$/t) utilizado na indústria  $p \in P$ ;
- $PC_{RDF/CF}$ : Fator de diferença do poder calorífico do RDF em relação ao combustível fóssil (em %); e
- $f_{\pi}$ : Grau de eficiência da planta TMB  $\pi \in \Pi$  para a produção do RDF.

### Emissão de GEE no transporte - GEETrans

Para a atividade de transporte utiliza-se a mesma lógica do inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (MMA, 2014) para o cálculo da emissão dos GEE. O GEETrans é o somatório do produto da distância total percorrida (km/dia) pelo fator de emissão de poluentes que resulta na emissão em kg de CO<sub>2</sub>/dia, conforme definido em (7).

$$GEETrans = (\sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} Dist_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{\pi p} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Dist_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} Dist_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Dist_{pt}) FeTrans \quad (7)$$

Sendo:

- $Dist_{ab}$ : Distância total (em km/dia) da origem  $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$  para o destino  $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$ ; e
- $FeTrans$ : Fator de emissão de GEE (em kg CO<sub>2</sub>/km) no transporte.

### Emissão de GEE no aterro sanitário – GEEAter

O GEEAter é o somatório do produto do valor unitário de emissão de GEE no aterro sanitário (kg de CO<sub>2</sub>/t) com a quantidade de resíduos e/ou rejeitos (t/dia) descartados. A Equação (8) resulta na emissão em kg de CO<sub>2</sub>/dia.

$$GEEAter = \sum_{t \in T} (\sum_{i \in I} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \iota_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \delta_{pt}^v) Fe_t \quad (8)$$

Sendo:

- $Fe_t$ : Emissão de GEE no descarte de resíduo e rejeito (em kg CO<sub>2</sub>/t) no aterro sanitário  $t \in T$ .

### Emissão de GEE na indústria – GEEInd

O GEEInd é o somatório do produto da quantidade RDF (t/dia) entregue na indústria com a diferença da emissão de GEE entre o CF e o RDF (kg de CO<sub>2</sub>/t de RDF). Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB ( $f_{\pi}$ ) para a transformação do RSU em RDF. O resultado fornece a emissão de GEE em kg de CO<sub>2</sub>/dia que entrará como ganho na função objetivo, conforme definido em (9).

$$GEEInd = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) (DiffFe_p^{v=3}) \quad (9)$$

Sendo:

- $DiffFe_p^{v=3}$ : Diferença da emissão de GEE na queima do combustível fóssil com o resíduo (em kg CO<sub>2</sub>/t de RDF) na indústria  $p \in P$ ; e
- $f_{\pi}$ : Grau de eficiência da planta TMB  $\pi \in \Pi$  para a produção do RDF.

### Consumo de energia no transporte – Etrans

O ETrans é o somatório do produto da distância total percorrida (km/dia) com o fator de energia consumida (óleo diesel) no transporte rodoviário (em MJ/km), que resulta no consumo de energia em MJ/dia, conforme definido em (10).

$$ETrans = (\sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} Dist_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{\pi p} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Dist_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} Dist_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Dist_{pt}) ETr \quad (10)$$

Sendo:

- $Dist_{ab}$ : Distância total (em km/dia) da origem  $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$  para o destino  $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$ ; e
- $ETr$ : Consumo de energia (em MJ/km) do diesel no transporte.

### Consumo de energia na indústria – EInd

O EInd é o somatório do produto da quantidade de RDF (t/dia) consumida na indústria com a energia produzida pelo CF (MJ/t de RDF) não utilizado pela substituição pelo RDF. Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB ( $f_{\pi}$ ) para a transformação do RSU em RDF. Sendo assim, o consumo de energia em MJ/dia, que entrará como ganho na função objetivo, é definido em (11).

$$EInd = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) (E_p^{v=3}) \quad (11)$$

Sendo:

- $E_p^{v=3}$ : Consumo de energia (em MJ/t) com a utilização do combustível fóssil na indústria  $p \in P$ ; e
- $f_{\pi}$ : Grau de eficiência da planta TMB  $\pi \in \Pi$  para a produção do RDF.

### Descarte do resíduo – DesAter

O DesAter é avaliado por meio do somatório da quantidade de resíduos (t/dia) transportado de cada planta TMB para o aterro sanitário, conforme definido em (12).

$$DesAter = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} l_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \delta_{pt}^v \quad (12)$$

Assim, após todo o detalhamento dos elementos das funções objetivo, apresentam-se a seguir as restrições que são contempladas no modelo matemático deste trabalho.

### 5.3 Restrições

As restrições do modelo matemático envolvem: capacidade máxima das plantas TMB, capacidade máxima de recebimento do RSU nas plantas de processamento e o balanceamento do volume de entrada-saída ao longo do processo. Além do domínio das variáveis de decisão que inclui não-negatividade e o conjunto discreto binário.

#### Capacidade máxima da planta TMB

A restrição de capacidade máxima (t/dia) da planta TMB é representada em (13).

$$\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi} \leq \bar{k}_{\pi} \varphi_{\pi} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (13)$$

Sendo:

- $\bar{k}_{\pi}$ : Capacidade máxima (em t/dia) da planta TMB na localidade  $\pi \in \Pi$ .

#### Capacidade máxima nas plantas de processamento

A restrição de capacidade máxima (t/dia) de recebimento do RDF na indústria e do RSU nas plantas de processamento está apresentada em (14).

$$\sum_{\pi \in \Pi} s_{\pi p}^v \leq \bar{g}_p^v \quad \forall v \in V, p \in P \quad (14)$$

Sendo:

- $\bar{g}_p^v$ : Capacidade máxima (em t/dia) da planta  $p \in P$  com tipologia  $v \in V$ .

#### Balanceamento do volume de entrada-saída

O balanceamento é necessário para garantir que a quantidade total de resíduos que entra no sistema seja deslocada até o descarte. Assim, as restrições (15) – (19) garantem esta conservação de fluxo.



$$a_i = \sum_{\pi \in \Pi} \alpha_{i\pi} + \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \beta_{ip}^v + \sum_{t \in T} \gamma_{it} \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi} = \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \zeta_{\pi p}^v + \sum_{t \in T} \iota_{\pi t} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} \beta_{ip}^{v=1} + \sum_{\pi \in \Pi} \zeta_{\pi p}^{v=1} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=1} \quad \forall p \in P \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} \beta_{ip}^{v=2} + \sum_{\pi \in \Pi} \zeta_{\pi p}^{v=2} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=2} \quad \forall p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{\pi \in \Pi} \zeta_{\pi p}^{v=3} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=3} \quad \forall p \in P \quad (19)$$

Sendo:

- $a_i$ : Quantidade de resíduo (em t/dia) gerado por cada nó de suprimentos  $i \in I$ .

A Restrição (15) garante que todo resíduo gerado seja destinado para os devidos destinos subsequentes, de acordo com a capacidade máxima da planta TMB. As Restrições (16) garante que todo resíduo que entra na planta TMB seja destinado para a planta de processamento adequada de acordo com as capacidades máxima de recebimento. E as Restrições (17) – (19) garantem o envio do rejeito gerado nas plantas de processamento para o aterro sanitário.

### Restrições de não negatividade

As restrições de não negatividade das variáveis de decisão contínuas estão representadas abaixo.

$$\alpha_{i\pi} \geq 0 \quad \forall i \in I, \pi \in \Pi \quad (20)$$

$$\beta_{ip}^v \geq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, p \in P \quad (21)$$

$$\zeta_{\pi p}^v \geq 0 \quad \forall \pi \in \Pi, v \in V, p \in P \quad (22)$$

$$\gamma_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (23)$$

$$\iota_{\pi t} \geq 0 \quad \forall \pi \in \Pi, t \in T \quad (24)$$

$$\delta_{pt}^v \geq 0 \quad \forall v \in V, p \in P, t \in T \quad (25)$$

### Variáveis binárias

Uma variável binária determina a abertura ou não de uma localidade candidata a uma planta TMB, conforme (26).

$$\varphi_{\pi} \in \{0, 1\} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (26)$$

As funções objetivo, parâmetros, variáveis de decisão e restrições apresentadas nesta seção, formam o modelo matemático de localização-alocação multiobjetivo para a inclusão do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU.

Além disso, para a resolução do problema multiobjetivo sugere-se o método *e-constraint*, onde cada função objetivo é solucionada separadamente em um modelo mono-objetivo que considera as restrições básicas da formulação matemática, e os resultados transformados em restrições com valores específicos ( $\epsilon$ ).

## 6 CONCLUSÕES

Na literatura encontram-se diversos estudos abordando a estruturação do sistema do RSU, porém os trabalhos desenvolvidos têm diversos focos e são específicos para cada estudo de caso. Dessa forma, este artigo tem como objetivo definir um modelo matemático genérico de otimização para estruturação do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento.

Por meio de uma revisão bibliográfica narrativa, foi possível identificar a composição das funções objetivo, e detalhar os parâmetros de decisão bem como os métodos matemáticos utilizados em cada artigo. Além disso, possibilitou a caracterização dos artigos por tipo de análise.

Com a avaliação destas referências, obteve-se como resultado a definição do tipo de modelo matemático, os parâmetros de decisão e as funções objetivo mais adequadas para a modelagem matemática para estruturação do sistema logístico reverso do RSU, mostrando-se uma metodologia adequada para elaboração deste artigo.

Embora o problema tenha sido expresso matematicamente, aplicativos de otimização podem apresentar problemas ao tentar resolver casos reais, sendo a principal limitação deste trabalho. Sendo assim, para futuras pesquisas recomenda-se que técnicas aproximadas, heurísticas e metaheurísticas, sejam elaboradas para obtenção das soluções de problemas reais.

Além disso, apesar da grande diversidade de estruturas no sistema logístico reverso do RSU, percebe-se que ainda são poucos os estudos que estruturam o sistema com a utilização do coprocessamento como alternativa de tratamento do resíduo. Dessa forma, o resultado deste trabalho pode ser útil para suporte aos futuros estudos que tem como objetivo a redução do envio do resíduo para descarte nos aterros sanitários.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE, ISWA. **Resíduos sólidos**: manual de boas práticas no planejamento. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais e International Solid Waste Association, São Paulo, Brasil, 2013.

- AKASAKA, Y., D'AGOSTO, M.A. Modelo conceitual do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, 2015. <http://dx.doi.org/10.6008%2FSPSC2179-6858.2015.002.0008>
- ARAGÓNES-BÉLTRAN, P., PASTOR-FERRANDO, J.P., GARCÍA-GARCÍA, F., PASCUAL-AGULLÓ, A. An analytic network process approach for siting a municipal solid waste plant in the metropolitan area of Valencia (Spain). **Journal of Environmental Management**, v. 91, pp. 1071-1086, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.12.007>
- BOVEA, M.D., IBÁÑEZ-FORÉS, V., GALLARDO, A., COLOMER-MENDOZA, F.J. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. **Waste Management**, n. 30, pp. 2383-2395, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.001>
- BRIZIO, E., GENON, G. Perspective and limits for cement kilns as a destination for RDF. **Waste Management**, v. 28, pp. 2375-2385, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022>
- Chang, N.B., Davila, E. Minimax regret optimization analysis for a regional solid waste management system. **Waste Management**, v. 27, n. 6, pp. 820-832, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.05.002>
- CHANG N., QI, C., ISLAM, K., HOSSAIN, F. Comparisons between global warming potential and cost-benefit criteria for optimal planning of a municipal solid waste management system. **Journal of Cleaner Production**, n. 20, pp. 1-13, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.017>
- CHEN, B., LI, P. FSILP: fuzzy-stochastic-interval linear programming for supporting municipal solid waste management. **Journal of Environmental Management**, n. 92, pp. 1198-1209, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.013>
- CHI, J.D.Y., FU, D.Z.C., HUANG, Q., NI, M. Energy-environment-economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: model development and case study. **Applied Energy**, n. 114, pp. 400-408, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.037>
- CNI-ABCP. **Indústria brasileira de cimento**: base para a construção do desenvolvimento. Confederação Nacional da Indústria e Associação Brasileira de Cimento Portland, Brasília, Brasil, 2012.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization, JohnWiley & Sons, Chichester, England, 2001.
- DE BRITO, M.P., DEKKER, R. **A framework for reverse logistics**. Erasmus Research, Institute of Management Report Series Research in Management, Erasmus University, Rotterdam, 2003.
- ERKUT, E., KARAGIANNIDIS, A., PERKOULIDIS, G., TJANDRA, S.A. A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. **European Journal of Operational Research**, n. 187, pp. 1402-1421, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.021>
- EPA. **Municipal solid waste in the United States**: 2011 facts and figures. Environmental Protection Agency, Washington, DC, Estados Unidos, 2011.
- EPA. **Decision-makers guide in solid waste management**. Environment

zal Protection Agency, Washington, DC, Estados Unidos, 1974.

EUBIONET. **Biomass co-firing**: an efficient way to reduce greenhouse gas emissions. European Bioenergy Networks, Finlândia, 2003.

EUROSTAT. **Municipal waste statistic**, 2014, Disponível em: <[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Municipal\\_waste\\_statistics#Municipal\\_waste\\_treatment\\_by\\_country](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment_by_country)>, Acesso em 02abr2016.

FARAHANI, R.Z., STEADIESEIFI, M., ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: a survey. **Applied Mathematical Modelling**, n. 34, pp. 1689-1709, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.005>

FEO, D., MALVANO, C. The use of LCA in selecting the best MSW management system. **Waste Management**, n. 29, pp. 1901-1915, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.021>

FERNÁNDEZ-NAVA, Y., RÍO, J., RODRÍGUEZ-IGLESIAS, J., CASTRILLÓN, L., MARAÑÓN, E. Life cycle assessment of different municipal solid waste management options: a case study of Asturias (Spain). **Journal of Cleaner Production**, n. 81, pp. 178-189, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.008>

GALANTE, G., AIELLO, G., ENEA, M., PANASCIA, E. A multi-objective approach to solid waste management. **Waste Management**, n. 30, pp. 1720-1728, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.039>

GARCIA, V.J. **Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 2005.

GENDEBIEN, A., LEAVENS, A., BLACKMORE, K., GODLEY, A., LEWIN, K., WHITING, K.J., DAVIS, R. **Refuse derived fuel, current practice and perspectives** (B4-3040/2000/306517/MAR/E3). Final Report, European Commission, Directorate General Environment, 2003.

HALE, B., MIRANDA, M.L. Waste not, Want not: the private and social costs of waste-to-energy production. **Energy Policy**, v. 25, pp. 587-600, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00050-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00050-5)

HONG-TAO, W., BAO-GUO, T., JI-TAO, S., YAN, Z., JI-MING, H. Approach of technical decision-making by element flow analysis and monte-carlo simulation of municipal solid waste stream. **Journal of Environmental Science**, n. 19, pp. 633-640, 2007. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60105-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60105-3)

HUANG, G.H., XU, Y., QIN, X.S., CAO, M.F. SRCCP: A stochastic robust chance-constrained programming model for municipal solid waste management under uncertainty. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 53, pp. 352-363, 2009\_a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.02.002>

HUANG, G.H., JING, S., XI, B.D., LI, Y.P., QIN, X.S., HUO, S.L., JIANG, Y. A hybrid inexact optimization approach for solid waste management in the city of Foshan, China. **Journal of Environmental Management**, n. 91, pp. 389-402, 2009\_b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.009>

HUANG, G.H, SUN, Y., LI, Y.P. ICQSWM: An inexact chance-constrained quadratic solid waste management model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 10, pp. 641-657, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.004>

HUANG, G.H., LI, Y.P., DAI, C. A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management – a case study of Beijing, China. **Journal of Environmental Management**, n. 92, pp. 3023-3037, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.038>

HUANG, G.H., ZHU, H. SLFP: A stochastic linear fractional programming approach for sustainable waste management. **Waste Management**, n. 31, pp. 2612-2619, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.009>

HUANG, G.H., WANG, S., YANG, B.T. An interval-valued fuzzy-stochastic programming approach and its application to municipal solid waste management. **Environmental Modelling & Software**, n. 29, pp. 24-36, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.10.007>

IBAM. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Instituto Brasileiro de Administração Municipal, Brasil, 2001.

IPTS. **Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from the world iron and steel industry**. European Communities e Institute for Prospective Technological Studies, 2003.

KOMILIS, D., MINIGLOU, M. Optimizing the treatment and disposal of municipal solid wastes using mathematical programming – a case study in a Greek region. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 80, pp. 46-57, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.004>

LEVIS, J.W., BARLAZ, M.A., DECAROLIS, J.F., RANJITHAN, S.R. A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management. **Environmental Modelling & Software**, n. 50, pp. 51-65, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.007>

LI, Y.P, HUANG, G.H, YANG, Z.F., NIE, S.L. An integrated two-stage optimization model for the development of long-term waste-management strategies. **Science of the Total Environment**, n. 392, pp. 175-186, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.028>

LI, Y.P., DAI, C., HUANG, G.H. A two-stage support-vector-regression optimization model for municipal solid waste management – a case study of Beijing, China. **Journal of Environmental Management**, n. 92, pp. 3023-3037, 2011\_a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.038>

LI, Y.P., CUI, L., CHEN, L.R., HUANG, G.H., LI, W., XIE, Y.L. An interval-based regret-analysis method for identifying long-term municipal solid waste management policy under uncertainty. **Journal of Environmental Management**, n. 92, pp. 1484-1494, 2011\_b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.006>

LU, H.W., HUANG, G.H., XU, Y., HE, L. Inexact two-phase fuzzy programming and its application to municipal solid waste management. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 25, pp. 1529-1536, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.08.006>

MCKINNON, A., CULLINANE, S., BROWNE, M., WHITEING, A. **Green logistics. Improving the environmental sustainability of logistics**, Pittsburg, Kogan Page Limited, 2010.

MAVROTAS, G., SKOULAXINO, S., GAKIS, N., KATSOUROS, V., GEORGOPOULOU, E. A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management. **Waste Management**, n. 33, pp. 1934-1949, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.04.012>

MMA. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários, relatório ano-base 2012**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brasil, 2104.

MORRISSEY, A.J., BROWNE, J. Waste management models and their application to sustainable waste management. **Waste Management**, v. 24, n. 3, pp. 297-308, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.005>

MURTZ, D., MORF, L. **The concept of co-processing waste material in the energy-intensive industries**. University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, 2007.

Pires, A., Chang, N., Martinho, G. An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setúbal Peninsula, Portugal. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 56, pp. 7-21, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.004>

RAVINDRA, K., KAUR, K., MOR, S. System analysis of municipal solid waste management in Chandigarh and minimization practices for cleaner emissions. **Journal of Cleaner production**, n. 89, pp. 251-256, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.036>

ROBBA, M., MINCIARDI, R., PAOLUCCI, M., SACILE, R. Multi-objective optimization of solid waste flows: environmentally sustainable strategies for municipalities. **Waste Management**, n. 28, pp. 2202-2212, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.003>

Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S. **Going backwards: reverse logistics trends and practices**. Reverse Logistics Executive Council, Pittsburgh, PA, 1998.

SRIVASTAVA, A.K., NEMA, A.K. Fuzzy parametric programming model for multi-objective integrated solid waste management under uncertainty. **Expert System with Applications**, v. 39, n. 5, pp. 4657-4678, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.022>

STEHLÍK, P., TABASOVÁ, A., KROPÁČ, J., KERMES, V., NEMET, A. Waste-to-energy technologies: impact on environment. **Energy**, v. 44, pp. 146-155, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.014>

SU, J., XI, B.D., LIU, H.L., WARITH, M.A. An inexact multi-objective dynamic model and its application in China for the management of municipal solid waste. **Waste Management**, n. 28, pp. 2532-2541, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.018>

SU, J., XI, B.D., HUANG, G.H., QIN, X.S., JIANG, Y.H., HUO, S.L., JI, D.F., YAO, B. An integrated optimization approach and multi-criteria decision analysis for supporting the waste-management system of the city of Beijing, China. **Engineering Application of Artificial Intelligence**, n. 23, pp. 620-631, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.002>

THIERRY, M., SALOMON, M., VAN NUNEN, J.A.E.E., VANWASSENHOVE, L.N. Strategic issues in product recovery management. **California Management Review**, v. 37, n. 2, pp. 114-135, 1995.

VEGO, G., KUCAR-DRAGICEVIC, S., KOPRIVANAC, N. Application of multi-criteria decision making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. **Waste**

**Management**, v. 28, n. 11, pp. 2192-2201, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.002>

YEOMANS, J.S. Solid waste planning under uncertainty using evolutionary simulation-optimization. **Socio-Economic Planning Sciences**, n. 41, pp. 38-60, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2005.04.002>

ZHANG, D.Q., TAN, S.K., GERSBERG, R.M. Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 91, pp. 1623-1633, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.012>

ZHANG, Y., HUANG, G.H., HE, L. A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. **Waste Management**, n. 34, pp. 553-561, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002>

ZHANG, X., HUANG, G. Optimization of environmental management strategies through a dynamic stochastic possibilistic multiobjective program. **Journal of Hazardous Material**, n. 246-247, pp. 257-266, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.036>



Artigo recebido em 28/08/2015 e aceito para publicação em 28/04/2016  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v16i3.2131>