



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas / UNIFAL-MG
Programa de Pós-graduação – Ciências Ambientais

Rua Gabriel Monteiro da Silva, 714. Alfenas - MG CEP 37130-000
Fone: (35) 3299-1379(Coordenação) / (35) 3299-1392 (Secretaria)
<http://www.unifal-mg.edu.br/ppgca/>



AUGUSTO DUARTE ALVARENGA

A TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS

Alfenas-MG, julho 2017

AUGUSTO DUARTE ALVARENGA

**A TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Dissertação apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL-MG.

Orientador: Dr. Eduardo Gomes Salgado

Assinatura do(a) Mestrando(a)

Assinatura do Orientador(a)

Alfenas-MG, Julho de 2017

AUGUSTO DUARTE ALVARENGA

**A TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL-MG.

Aprovada em:

Profº. Dr. Eduardo Gomes Salgado
Instituição: Universidade Federal de Alfenas Assinatura:

Profº. Dr. Cláudio Antônio de Andrade Lima
Instituição: Universidade Federal de Alfenas Assinatura:

Profº. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
Instituição: Universidade Federal de Lavras Assinatura:

*Dedico esta dissertação aos meus pais e
irmãos por sempre estarem comigo!!*

RESUMO

A produção de resíduos sólidos urbanos vem crescendo devido ao aumento populacional e mudanças no estilo de vida. Esses resíduos são normalmente destinados para formas de disposição final em aterros. Entretanto, essa destinação final não está conseguindo suprir os altos volumes de resíduos produzidos além de causar problemas ambientais e sociais. Existe uma tendência para buscar cenários integrando tecnologias de tratamento para diminuir os impactos ambientais, econômicos e sociais, possibilitando a recuperação de produtos secundários tornando esse processo mais viável financeiramente. Porém, existe muitas barreiras para alcançar esse cenário integrado como investimento inicial, conhecimento teórico pelos tomadores de decisão, conscientização populacional, etc. Algumas ferramentas como *Life Cycle Assessment* e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* tem o potencial de auxiliar nessa tomada de decisão quando envolve múltiplos critérios. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo combinar essas duas ferramentas para criar um modelo de tomada de decisão que ajude os tomadores de decisão a buscar um cenário integrado de gestão de resíduos sólidos urbanos.

Palavras chave: *Solid waste*; resíduos sólidos urbanos; tomada de decisão; gestão integrada.

ABSTRACT

The production of urban solid waste has been increasing worldwide due to both population growth and its changes in lifestyle. This waste is usually intended for final disposal storages in landfills. However, this final destination has not been able to supply the high volumes of waste produced, besides causing environmental and social problems. Today, there is a tendency to seek settings where it is possible to integrate treatment technologies in order to reduce environmental, economic and social impacts, enabling the recovery of secondary products which makes this process more financially viable. Although, there are several hurdles before achieving that integrated setting such as initial investment, theoretical knowledge by decision makers, population awareness, etc. Some tools, for example “Life Cycle Assessment and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution”, are able to assist in decision making when it involves multiple criteria. Thus, this paper aims at combining these two tools to create a decision-making model that helps decision-makers to seek an integrated setting for solid urban waste management.

Keywords: *Solid waste; urban solid waste; decision-making; integrated management.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Geração de RSU de acordo com a renda e os anos	10
Figura 1.2 Fluxo de trabalho da revisão sistemática	21
Figura 1.3 Frequência do uso de ferramentas	24
Figura 1.4 Gestão Integrada	29
Figura 1.5 Frequência que as alternativas ocuparam a 1º preferência nos trabalhos estudados	31
Figura 1.6 Frequência que as alternativas ocuparam a 1º ou a 2º preferência nos trabalhos estudados	31
Figura 1.7 Principais critérios	34
Figura 1.8 Número de subcritérios	35
Figura 1.9 Critérios ambientais mais vistos	36
Figura 1.10 Critérios ambientais menos vistos	36
Figura 1.11 Critérios econômicos mais vistos	37
Figura 1.12 Critérios sociais mais vistos	38
Figura 1.13 Critérios técnicos mais vistos	38
Figura 1.14 Critérios políticos mais vistos	39
Figura 1.15 Critérios administrativos mais vistos	39
Figura 1.16 Matriz de decisão	41
Figura 2.1 Matriz de decisão	61
Figura 2.2 Representação	65
Figura 2.3 Análise de sensibilidade	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência do uso das ferramentas pelos objetivos	26
Tabela 2 – Critérios observados na literatura	33
Tabela 2.1 – Priorização das alternativas de GRSU	63

LISTA DE SIGLAS

AHP- Analytic Hierarchy Process

ANP - Analytic Network Process

CBA - Análise de custo benefício

GRSU – Gestão de resíduos sólidos urbanos

LCC - Avaliação ciclo de custeio

LCA - Life cycle Assessment

MCDM – Multicriteria decision making

PROMETHEE: Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations

TDM – Tomada de decisão multicriterial

TOPSIS - Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	11
REFERÊNCIAS	16
2 ARTIGO 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA DE FERRAMENTAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	19
2.1 – INTRODUÇÃO	19
2.2 – METODOLOGIA DA REVISÃO	21
2.3 – PROBLEMAS RELACIONADOS A GRSU	22
2.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
2.4.1 – PRINCIPAIS FERRAMENTAS NA TOMADA DE DECISÃO	24
2.4.4.1 – FERRAMENTAS NA TOMADA DE DECISÃO NA GRSU	25
2.4.1.2 – RELAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS E OS OBJETIVOS	27
2.4.2 – GESTÃO INTEGRADA	28
2.4.3 – FREQUÊNCIA EM CENÁRIOS IDEAIS	29
2.4.4 – ALTERNATIVAS E CENÁRIOS DA GRSU	31
2.4.4.1 – CENÁRIOS IDEAIS	32
2.4.5 – PRINCIPAIS CRITÉRIOS	33
2.5 – CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	45
3 ARTIGO 2 – A TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE MUNICÍPIOS PEQUENOS BRASILEIROS	52
3.1 – RESUMO	52
3.2 – INTRODUÇÃO	52
3.3 – REVISÃO DA LITERATURA	55
3.3.1 – GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	55
3.3.2 – MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO	58
3.4 – METODOLOGIA	59
3.4.1 – <i>TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCE FOR SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION (TOPSIS)</i>	60
3.4.2 – APLICAÇÃO DO MODELO	61
3.5 – RESULTADO E DISCUSSÕES	64
3.5.1 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	66
3.6 – CONCLUSÕES	68

REFERÊNCIAS	70
4 – CONCLUSÃO GERAL	75
APÊNDICE	77

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico, as mudanças de hábitos e os padrões de desenvolvimento da sociedade moderna levaram a uma maior produção de resíduos sólidos aumentando os impactos sobre o meio ambiente. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é a maior fonte de resíduos do mundo e esse valor tende a continuar crescendo (LEME *et al.*, 2014; ACHILLAS *et al.*, 2011). De 2002 a 2012 a produção RSU passou de 0,68 bilhões de toneladas (0,64 Kg por pessoa por dia) para 1,3 bilhões de toneladas (1,2 Kg por pessoa por dia) no mundo. Estima-se que esse valor atingirá 2,2 bilhões de toneladas até 2025 (THE WORLD BANK, 2012). Essa geração varia de acordo com a cultura regional, o tamanho das cidades e renda per capita por ter uma influência direta na rotina das pessoas, como ilustrado na Figura 1.1. Essa geração tem crescente influência socioeconômica, a saúde humana, comodidades de muitas comunidades (KOLLIKATHARA *et al.*, 2009) e ambiental (SUTHAR; SAJWAN, 2014; ACHILLAS *et al.*, 2013), sendo um ponto estratégico na busca pela sustentabilidade.

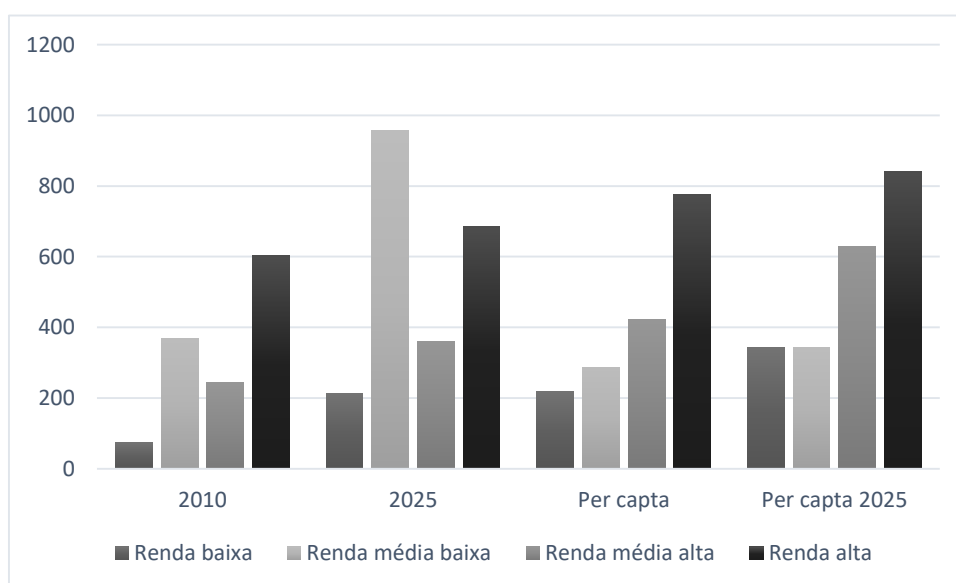


Figura 1.1: Geração de RSU de acordo com a renda e os anos. Adaptado de The World Bank (2012)

Uma investigação científica mostra que a deposição direta de RSU em aterros é uma prática de tratamento frequente em todo mundo e apresenta um impacto ambiental maior que outras alternativas modernas (SUTHAR; SAJWAN, 2014; ACHILLAS *et al.*, 2011, CHERUBINI *et al.*, 2009; EMERY *et al.*, 2007; KONECZNY; PENNINGTON, 2007; MARCHETTINI *et al.*, 2007; MENDES *et al.*, 2004,). Por outro lado, práticas modernas

de tratamento de resíduos sólidos como incineração, sistema de biogás, pirólise, etc., exigem elevados investimentos iniciais e de manutenção (SUTHAR; SAJWAN, 2014). Além disso, na maioria dos países, as autoridades locais são responsáveis pela coleta, triagem, reciclagem e seleção das alternativas de tratamento dos RSU. Devido às variações de padrões físico-químico e de possíveis problemas ambientais, econômicos e sociais, a seleção dessas alternativas é um problema complexo que envolve múltiplos critérios a serem considerados (ANTONOPOULOS, 2014; SOLTANI, 2015).

Políticas públicas em relação aos resíduos sólidos estão sendo implantadas na União Europeia como a Diretiva de 2008/98/CE que classifica hierarquicamente práticas de gestão dos resíduos (i) prevenção, (ii) reutilização, (iii) reciclar, (iv) valorização e (v) eliminação. Essas políticas têm o objetivo de definir metas de reciclagem e recuperação, com o intuito de diminuir o uso dos aterros como alternativa para disposição dos resíduos sólidos (COMISSÃO EUROPEIA, 2008). Além disso determinados tipos de resíduos como combustíveis ou orgânicos não tratados já são proibidos em alguns países membros da União Europeia como, Dinamarca, Suécia e Alemanha.

Por outro lado, no Brasil 58,17% do volume dos resíduos coletados são destinados a disposição final em aterros, sendo que 59,71% dos municípios destinam os resíduos para locais irregulares como aterros controlados e lixões (PNRS, 2015). Estes aterros irregulares não possuem drenagem de gases e chorume, possui menor vedação e muitas vezes não são cobertos diariamente (LEME *et al.*, 2014). Em 2015, 17,2% dos RSU tinham o Lixão como destino final e 24,1% em Aterros Controlados de um total de 79,9 milhões de toneladas (PNRS, 2015). Só recentemente o Brasil implementou sua primeira medida para gerenciar os RSU; Lei 12.305/2010 que incentiva a gestão integrada, estabelece princípios, objetivos, instrumentos, delega responsabilidades aos produtores, governos locais e fornece um guia para resíduos perigosos e instrumentos econômicos a ser aplicado. Porém essa política não estabelece obrigações com objetivos e prazos nem para os resíduos sólidos nem para a recuperação de gases e energia produzidas no aterro (LOUREIRO *et al.*, 2013).

A ideia de que uma única alternativa de tratamento não é o suficiente para reduzir, recuperar e valorizar os resíduos é evidente, levando a combinação de processos e alternativas de tratamento de resíduos sólidos formando a gestão integrada. A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos busca minimizar impactos ambientais e sociais podendo ter benefícios econômicos. Essas práticas buscam reduzir a produção de resíduos, direcionar uma parte para o reaproveitamento e recuperar materiais para reciclagem em produtos secundários como a

energia e adubo (LEME *et al.*, 2014). Cada técnica alternativa de tratamento de resíduos sólidos incorpora desempenho em relação aos gases lançados na atmosfera, destino final dos resíduos e proteção de efluentes (CHERUBINI *et al.*, 2009). Porém, o uso dessas alternativas como a reciclagem, compostagem, incineração não é uma garantia de benefícios ambientais devido aos altos custos desses processos. Dessa forma, com o uso de ferramentas de gestão, os municípios devem ser incentivados a definir quais critérios ambientais, sociais e econômicos são mais adequados para seu plano de gestão de resíduos (KOLLIKKATHARA *et al.*, 2009).

A Tomada de Decisão Multicriterial (TDM) é uma subárea do conhecimento com um campo de pesquisa consolidado e ativo desde 1960. A TDM utiliza conhecimento matemático, teoria da decisão comportamental, economia, engenharia de software, computacional e sistemas de informação para priorizar/ranquear alternativas finitas com base em critérios finitos nas mais diversas áreas de conhecimento (BEHZADIAN, 2012). Sua popularidade é principalmente por formular soluções com base num acordo entre as partes interessadas. A solução pode não ser ideal para um determinado setor, mas é a ponderação das partes envolvidas (SOLTANI, 2015). Dentre os métodos de tomada de decisão, podemos exemplificar o método proposto por Hwang e Yoon (1981), conhecido como a *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPISIS). Esse método é uma ferramenta de apoio à decisão multicriterial que continua crescendo exponencialmente em números de publicações. Em uma revisão feita por Behzadian *et al.* (2012), com 266 trabalhos publicados em 103 periódicos de 2000 até 2012, foi visto a aplicação bem sucedida do TOPISIS em diversas áreas de conhecimento como Gestão de Cadeia de Suprimentos, Logística, Negócios e Marketing, Saúde e Meio Ambiente, Sistemas de Produção, Recursos Humanos, Gestão de Energia, Hídrica, Engenharia Química, Medicina, Agricultura, entre outros. Outro método é o *Life Cycle Assessment* (LCA). O LCA é uma ferramenta também consolidada na literatura que registra as entradas e saídas dos sistemas para avaliar os impactos ambientais. Pode ser observado sua aplicação em várias áreas como na geração de eletricidade (TURCONI; ASTRUP, 2013), em veículos elétricos (HAWKINS *et al.*, 2012), águas residuais (COROMINAS *et al.*, 2013), etc.

A combinação de mais de uma ferramenta de apoio a decisão multicriterial é comum e bem visto na comunidade científica como forma de minimizar erros e pontos fracos das ferramentas. Dentre os trabalhos revisados por Behzadian *et al.* (2012), 23,3 % desses combinavam a metodologia TOPISIS com a *Analytic Hierarchy Process* (AHP), sendo que essas combinações eram em diferentes áreas de atuação e com aplicações bem-sucedidas. Essas ferramentas foram utilizadas na GRSU para priorizar alternativas com base na sustentabilidade,

ou para recuperação de energia, ou para redução dos resíduos, resíduos médicos, orgânicos, ou para priorizar rotas de recolha, lugar de implementação, entre outros (EKMEKÇIOGLU *et al.*, 2010; NIXONA *et al.*, 2013; SU *et al.*, 2010; AL-SALEM *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2014). Esses trabalhos ocorrem com uma maior frequência em regiões populosas e povoadas devido o volume de resíduos produzidos e os problemas associados como no sudeste Asiático (GENG *et al.*, 2010; SONG *et al.*, 2013; KHAN *et al.*, 2008). A Europa também se destaca nesses estudos demonstrando uma preocupação com a destinação final dos resíduos buscando uma GRSU mais sustentável (PIRES *et al.*, 2011; ERIKSSONA *et al.*, 2005; CHERUBINIA *et al.*, 2009). Nos outros continentes a frequência de trabalhos desse tipo é menos evidente. No Brasil foram encontrados dois trabalhos que priorizam alternativas adequadas para a região nordeste (LIMA *et al.*, 2013) e para a região sul (LIMA *et al.*, 2014). Existe a necessidade de mais trabalhos envolvendo a tomada de decisão na GRSU no Brasil para contribuir na ordem teórica e prática com os municípios que precisam se adequar à Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

Trabalhos de revisões são importantes por sintetizar informações permitindo análises em outras escala. Já foram observados trabalhos de revisões que contribuem com essa visão. Esses trabalhos identificam quais as principais ferramentas usadas na GRSU (KARMPERIS *et al.*, 2013; ALLESCH; BRUNNER, 2014) ou as diferenças entre países desenvolvidos ou em desenvolvimentos entorno desse problema (MARSHALL; FARAHBAKHS, 2013). Além disso, outros trabalhos abordam a reciclagem e recuperação de resíduos (AL-SALEM *et al.*, 2009) ou ainda focam em uma determinada tecnologia de tratamento dos resíduos (KADAFI *et al.*, 2014; MCKAY, 2012). Entretanto, não foram identificados trabalhos que identifica-se as principais regiões de estudos da GRSU, assim como das principais ferramentas utilizadas na tomada de decisão, os principais critério e alternativas de tratamento dos RSU.

Assim, o objetivo dessa dissertação é produzir uma revisão sistemática da literatura que amplia a visão entorno das ferramentas, critérios e alternativas de tratamento dos resíduos envolvidos na GRSU. Outro objetivo é produzir e aplicar um modelo direcionado para a cidade de Alfenas-MG focando na sequência de implementação de alternativas de tratamento de resíduos sólidos urbanos buscando uma gestão integrada. Sendo que, a maioria dos trabalhos que utilizam a tomada de decisão multicriterial foca na seleção de uma alternativa ou cenário sustentável ou que recupere energia, entretanto, não foram encontrados trabalhos que foque em uma sequência de implementação de alternativas de tratamento de RSU buscando um cenário ideal, sendo está a justificativa para o segundo artigo dessa dissertação. Assim sendo, esta dissertação pretende responder as seguinte perguntas:

- Quais as principais ferramentas de apoio a decisão utilizadas na GRSU na literatura?
- Quais os principais critérios adotados em decisões de GRSU?
- Quais as alternativas tecnológicas que apresentam melhor prioridade na GRSU?
- Qual a melhor sequência de implementação de tecnologias de tratamento de RSU buscando uma gestão integrada com base nas barreiras encontrados pelos municípios?
- Qual o cenário de GRSU é mais sustentável?

Essa dissertação está organizada nesta introdução geral seguido pelo artigo 1 que consiste em uma revisão sistemática da literatura das ferramentas que auxiliam na tomada de decisão na priorização de alternativas ou cenários de GRSU. Posteriormente é apresentado o artigo 2 que propõe um modelo que identifica uma sequência de implementação das alternativas de tratamento dos RSU com base nas condições do município, seguido por uma conclusão geral.

REFERÊNCIAS

- ACHILLAS C.H. *et al.* **Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area.** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 55, n. 9, p. 857–863, 2011.
- ACHILLAS C.H. *et al.* **The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review.** *Waste Management Research*, London, vol. 31, n. 2, pp. 115–129, 2013.
- ALLESCH, A.; BRUNNER, P.H. **Assessment methods for solid waste management: A literature review.** *Waste Management & Research*, London, vol. 32, n.6, p. 461–473, 2014.
- AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J., **Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review,** *Waste Management*, London, vol. 29, n. 10, p. 2625–2643, 2009.
- ANTONOPOULOS, I.-S. *et al.* **Ranking municipal solid waste treatment alternatives considering sustainability criteria using the analytical hierarchical process tool,** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 86, p. 149–159, 2014.
- BEHZADIAN, M. *et al.* **A state-of the-art survey of TOPSIS applications.** *Expert Systems with Applications*, London, vol. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012.
- BRASIL. **Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Política Nacional dos Resíduos Sólidos.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, agosto de 2010.
- CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration,** *Energy*, London, vol. 34, p. 2116–2123, 2009.
- COROMINAS, L. *et al.* **Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art.** *Water research*, London, vol. 47, p. 5480-5492, 2013.
- EMERY, A. *et al.* **Environmental and economic modelling: a case study of municipal solid waste management scenarios in Wales.** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 49, p. 244–263, 2007.
- ERIKSSON, O. *et al.* **Municipal solid waste management from a systems perspective,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 13, p. 241–252, 2005.
- GENG, Y.; TSUYOSHI, F.; CHEN, X. **Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 18, p. 993-1000, 2010.
- HAWKINS, T.R. *et al.* **Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles,** *Journal of Industrial Ecology*, New Haven, vol. 17, p. 53-64, 2012.

HWANG, C.L.; YOON, K. **Methods for Multiple Attribute Decision Making**, *Multiple Attribute Decision Making*, Berlin, vol. 186, p.58-191, 1981.

KHAN, S.; FAISAL, M.N. **An analytic network process model for municipal solid waste disposal options**, *Waste Management*, London, vol. 28, p. 1500–1508, 2008.

KOLLIKATHARA, N.; FENG, H.; STERN, E. **A purview of waste management evolution: Special emphasis on USA**. *Waste Management*, London, vol. 29, n. 2, p. 974–985, 2009.

LEME M.M.V. *et al.* **Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil**. *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 87, p. 8-20, 2014.

LIMA, J.D. *et al.* **Modelo de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região nordeste do Brasil**, *Revista AIDIS*, São Paulo, vol. 6, n. 3, p. 11–28, 2013.

LIMA, J.D. *et al.* **Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil**. *Eng Sanitária Ambiental*, Rio de Janeiro, vol. 19, p. 33-42, 2014.

LIU, H.C. *et al.* **Site selection in municipal solid waste management with extended VIKOR method under fuzzy environment**. *Environmental Earth Sciences*, Brandenburg, vol. 72, p. 4179–4189, 2014.

LOUREIRO S.M.; ROVERE E.L.L.; MAHLER C.F. **Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil in the state and city of Rio de Janeiro**. *Waste Management*, London, vol. 33, n. 5, p. 1302–1312, 2013.

MARCHETTINI N.; RIDOLFI R.; RUSTICI M. **An environmental analysis for comparing waste management options and strategies**. *Waste Management*, London, vol. 27, n.4, p. 562–571, 2007.

MENDES, M.R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. **Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA**, *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 41, p. 47–63, 2004.

NIXON, J.D. *et al.* **Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process**, *Energy*, London, vol. 59, p. 215–223, 2013.

PIRES, A.; CHANGB, N.B.; MARTINHOA, G. **An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setubal Peninsula, Portugal**, *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 56, p. 7-21, 2011.

SOLTANI, A. *et al.* **Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review**. *Waste Management*, London, vol. 35, p. 318-328, 2015.

SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. **Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 57, p. 92-100, 2013.

SU, J.P. et al. **Applying multi-criteria decision-making to improve the waste reduction policy in Taiwan.** *Waste Management & Research*, London, vol. 28, p. 20-28, 2009.

SUTHAR, S.; SAJWAN, A. **Rapid impact assessment matrix (RIAM) analysis as decision tool to select new site for municipal solid waste disposal: A case study of Dehradun city, India.** *Sustainable Cities and Society*, Amsterdam, vol. 13, p. 12-19, 2014.

THE WORLD BANK. **What a waste: a global review of solid waste management.** 2012. Retrieved from <<http://go.worldbank.org/BCQEP0TMO0>>.

TURCONI, R.; ASTRUP, A.B.T. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, vol. 28, p. 555–565, 2013.

2 ARTIGO 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA DE FERRAMENTAS PARA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica do homem acabou afastando-o dos processos naturais, e por muitos anos, foi normal considerarmos e analisarmos o homem e suas atividades a parte do mundo natural. Porém hoje, o conceito de que somos parte da natureza e que nossos processos precisam estar integrados aos processos naturais estão ganhando força, mas essa reintegração é um desafio. O problema é que muitos dos produtos derivados da atividade humana tem um tempo de processamento relativamente longo pelos processos naturais, necessitando de processos adicionais para evitar o esgotamento e o acúmulo de recursos e resíduos, respectivamente (CHERUBINI *et al.*, 2008).

Com a industrialização alinhado com o crescimento demográfico e as mudanças nos padrões de vida e consumo levou a um aumento vertiginoso da produção de RSU (NIXON *et al.*, 2013; TANA *et al.*, 2014; SAMAH *et al.*, 2011) e tende a continuar crescendo (DONG *et al.*, 2014; SONG *et al.*, 2013) (WORLD BANK.).

Por todo o mundo a disposição final dos resíduos é a forma de gestão dos resíduos mais usada, seja ela em lixões, aterros controlados ou aterros sanitários. Porém, sabe-se que essa não é a melhor destinação dos RSU pelos impactos ambientais e sociais que eles carregam (YAY, 2015). O número de tecnologias de tratamento de RSU vem crescendo juntamente com trabalhos que buscam identificar combinação dessas tecnologias e processos para formar uma gestão integrada que apresenta melhores desempenhos ambientais, sociais e econômicos (ARIKAN *et al.*, 2017; YAP; NIXON, 2015; DONG *et al.*, 2014; NOURI *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2011). Entretanto, essa gestão integrada tem custos iniciais consideravelmente maiores (YAP; NIXON, 2015).

Está consolidado na literatura métodos de tomada de decisão (MCDM) e de avaliação do ciclo de vida (LCA) que ampliam a visão e oferecem uma orientação que auxiliam na tomada de decisão de problemas complexos multicriteriais como a GRSU. Essas ferramentas auxiliam na seleção da alternativa que possui melhor desempenho em relação aos critérios avaliados. Na

literatura pode-se observar trabalhos envolvendo MCDM em diversas áreas como seleção de fornecedores (KARSAK; DURSUN, 2015), risco financeiro (KOU *et al.*, 2014), seleção de materiais (ANOJKUMAR *et al.*, 2014), na GRSU (KHARAT *et al.*, 2016; SOLTANI *et al.*, 2016), entre outros. A aplicação do LCA também é visto em áreas variadas como na geração de energia elétrica (TURCONI; ASTRUP, 2013), na comparação de tipos de veículos (HAWKINS *et al.*, 2012), no tratamento de águas residuais (COROMINAS *et al.*, 2013), entre outros. Essas ferramentas auxiliam na GRSU na busca seleção da melhor alternativa ou cenário de tratamento dos resíduos, do lugar mais adequado de instalação de plantas de tratamento, melhores rotas de recolha, etc.

O foco na GRSU, como de todos os tipos de resíduos, precisa ser a estratégia “Emissão Zero”, baseados nos ciclos naturais e em concordância com a economia circular na aplicação da logística reversa dos RSU. Nessa abordagem, todos os resíduos são vistos como matéria bruta para um outro processo sendo direcionado para setores empresariais através da logística reversa, e assim evitar o acúmulo de resíduos promovendo a economia circular (FERRI *et al.*, 2015). Parte dos resíduos são direcionados para a reciclagem, transformando-os para serem aproveitados. É evidente que alguns desses resíduos terão escalas temporais de processamento diferentes, mas ele precisa ser pelo menos igual a sua emissão para ser sustentável (CHERUBINI *et al.*, 2008).

O objetivo deste artigo é produzir uma revisão sistemática que sintetiza e analisa informações de artigos científicos que aplicaram a tomada de decisão na GRSU. Sendo que existem trabalhos de revisão que respondem quais as principais ferramentas utilizadas na GRSU (KARMPERIS *et al.*, 2013; ALLESCH; BRUNNER, 2014) ou as diferenças entre países desenvolvidos ou em desenvolvimentos entorno desse problema (MARSHALL; FARAHBAKHSH, 2013). Além disso, outros trabalhos abordam a reciclagem e recuperação de resíduos (AL-SALEM *et al.*, 2009) ou ainda focam em uma determinada tecnologia (KADAFI *et al.*, 2014; MCKAY, 2012). Entretanto não foram encontrados revisões que identificam os principais critérios e alternativas na GRSU, sendo está a principal justificativa do trabalho. A identificação desses itens é útil na utilização das ferramentas de tomada de decisão multicriterial.

Assim, essa revisão sistemática busca comparar os dois métodos de auxílio a tomada de decisão na GRSU mais populares (MCDM e LCA) (ALLESCH; BRUNNER, 2014) para responder as seguintes perguntas:

- Quais são as principais ferramentas que apoiam a tomada de decisão na GRSU?
- Quais são os principais critérios envolvidos na GRSU?
- Quais são as alternativas que apresentam melhor desempenho na GRSU?

O artigo foi estruturado em cinco seções. Primeiramente temos uma breve contextualização em relação aos RSU, seguido pelo método de pesquisa de uma revisão sistemática inspirada no trabalho de Biolchini *et al.* (2007), subsequente foi feita uma análise dos problemas relacionados a GRSU, continuando com a análise dos resultados da compilação das informações encontrados nos artigos selecionados e, por fim, uma conclusão.

2.2 METODOLOGIA DA REVISÃO

Para o desenvolvimento desse artigo foi aplicada a revisão sistemática da literatura inspirada no trabalho de Biolchini *et al.* (2007). A Figura 1.2 apresenta os passos da revisão. Inicialmente foram definidos as bases de buscas, sendo que o Google Scholar e Scopus foram selecionados na tentativa de obter uma maior abrangência de pesquisa. Depois foram escolhidos as palavras chaves envolvidas na tomada de decisão e GRSU para criar as seguintes expressões booleanas: [*“MCDM and solid residues waste”* or *“Sustainability and MCDM and Solid Urban Waste”*] e a combinação de diferentes ferramentas de apoio a decisão com *“treatment of municipal solid residues waste”* como [*“AHP and treatment of municipal solid residues waste”* or *“TOPSIS and treatment of municipal solid residues waste”* or *“PROMETHEE and treatment of municipal solid residues waste”* or *“LCA and Treatment of municipal solid residues waste”*].

Dos 48 trabalhos utilizados para compor os dados desta revisão encontrados no Google Scholar, 41 também foram encontrados também na Scopus. Apenas pesquisas publicadas em revistas foram considerados por possuírem dados mais confiáveis devido às revisões por pares. Primeiramente foram selecionados apenas artigos em inglês, entretanto, como não foram encontrados artigos da América do Sul, para enquadrar dados dessa região nas análises, foram acrescentados dois trabalhos brasileiros em português. Foram utilizados nessa revisão 48 trabalhos dos identificados nas buscas. Esses trabalhos foram selecionados por conterem

informações úteis para responder as perguntas desta revisão. Alguns dos trabalhos não selecionados se tratavam do tratamento de resíduos específicos como orgânicos (BABALOLA, 2015), eletrônicos (SOUZA *et al.*, 2016), saúde (LIU *et al.*, 2013), seleção de lugar de instalação de alternativas de GRSU (LIU *et al.*, 2014) ou ainda que não foi possível acessar (KAHRAMAN; SARI, 2012).

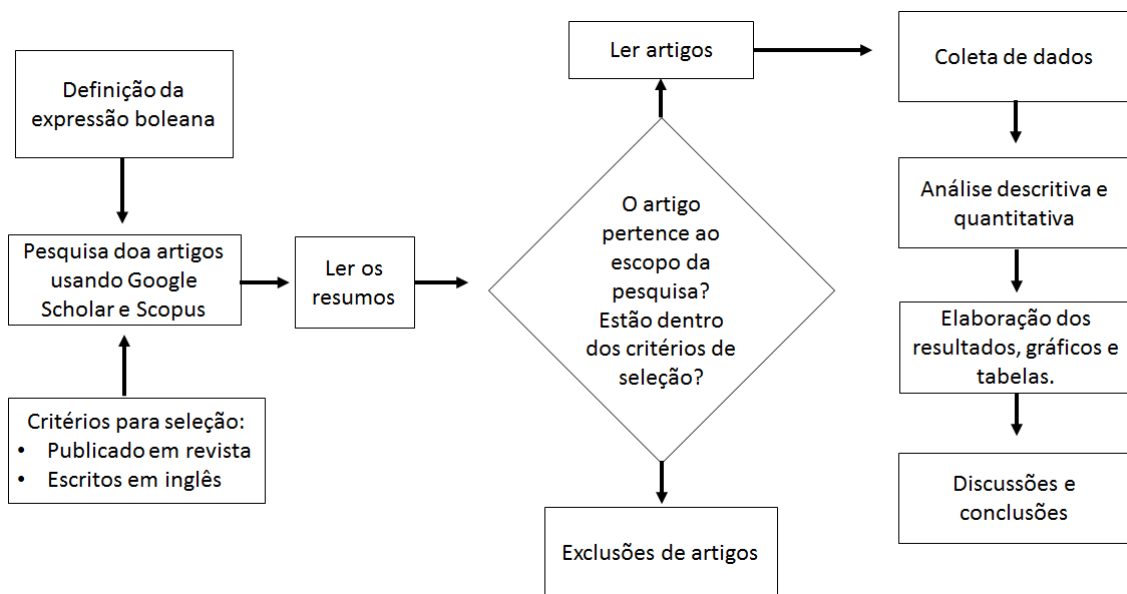


Figura 1.2: Fluxograma do trabalho da revisão.

Essa revisão se concentrou em trabalhos que utilizam métodos de tomada de decisão multicriterial (MCDM) e avaliação do ciclo de vida (LCA) na GRSU. Essas ferramentas, dependendo da configuração de sua matriz de decisão, tem potencial para obter uma avaliação dos impactos ambientais, energética, econômica, social, sustentável, etc. Assim, outros métodos de avaliação como *benckmarking* (FILHO, *et al.* 2016), *Cost benefit analysis* (CBA) (MAVROTAS, *et al.* 2015), não foram identificados nas buscas. Allesch e Brunner (2014) demonstraram que as ferramentas MCDM e LCA respondem por mais de 50% dos trabalhos que avaliam a GRSU de alguma forma.

2.3 PROBLEMAS RELACIONADOS A GRSU

O crescimento vertiginoso da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) têm chamado a atenção de especialistas, governo, entidades e população (THE WORLD BANK, 2012; SOLTANI *et al.*, 2016; KHARAT *et al.*, 2016). Existe uma certa dificuldade em mensurar os

volumes e as características dos RSU, principalmente em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, devido à falta de equipamentos, organização nos processos e muitas vezes, parte desses RSU não chegam a ser coletados para uma destinação final (INGLEZAKIS *et al.*,2014; YAY, 2015; SU *et al.*,2010). Toda essa falta de estrutura, gerencia e coleta de informações entorno da GRSU dificulta a tomada de decisão.

A disposição final dos resíduos, além de não ser ideal para uma ampla variedade de compostos presentes nos RSU, está ficando insustentável para o grande volume que é destinado (INGLEZAKIS *et al.*,2014). Outro ponto importante é a necessidade de monitoramento e manutenção do aterro por toda a sua vida depois de sua saturação. Além disso, é comum ver locais de disposição final que não possuem as características/normas de um aterro sanitário, se caracterizando como aterro controlado ou até em lixões de céu aberto (quando não existe nenhuma estrutura de cobertura e vedação para o subsolo dos RSU) ocasionando poluição de corpos de água, solo e emissões atmosféricas, problemas de saúde, vibrações, queimadas e explosões (KHARAT *et al.*, 2016; YAY, 2015; THAMPI; RAO, 2015; DONG *et al.*,2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2014; TSENG, 2009; LOUIS *et al.*, 2007).

Existe uma falta de interesse das partes governamentais dos municípios e da população, que possuem a responsabilidade partilhada da GRSU. Além disso, a locais em que não existe o incentivo jurídico/legal da união de municípios para resolverem essa questão produzindo um centro comum de GRSU, o que acaba dificultando as ações (HUNG *et al.*,2007). A ausência de recursos, a falta de apoio financeiro e a relutância dos usuários em pagar pelo o serviço, torna a GRSU um peso nas finanças dos municípios. Entre as principais barreiras enfrentadas pelos tomadores de decisão na GRSU estão a falta de conhecimento sobre os problemas gerados e de alternativas de tratamento, a falta de recursos financeiros, infraestrutura, de organização e liderança institucional, de dados confiáveis, entre outros (GUERRERO *et al.*,2013).

Assim sendo, há a necessidade de tomar medidas para acabar com esse problema. Essas medidas precisam ser amplas envolvendo a conscientização da população, o desenvolvimento do conhecimento dos tomadores de decisão, a busca por fundos de apoio e incentivo governamental, o incentivo à busca de dados mais precisos, o desenvolvimento do mercado da reciclagem e de produtos recuperados. Uma GRSU sustentável, além de resolver os diversos problemas descritos, é uma oportunidade de obter ganhos econômicos com a comercialização de produtos secundários e ganhos sociais com por exemplo a geração de emprego.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 PRINCIPAIS FERRAMENTAS DE TOMADA DE DECISÃO

Existe uma certa variedade de métodos que auxiliam a resolução de problemas como a GRSU. Os três principais modelos de auxílio a gestão são a decisão multicriterial (MCDM), avaliação do ciclo de vida (LCA) e o programação multi-objetiva (MOP) (SU *et al.*, 2010). Hung *et al.* (2007) acrescentaria também a análise de custo benefício (CBA), porém uma avaliação que aborda vários critérios, muitas vezes conflitantes, de uma maneira multidimensional conduz a uma tomada de decisão mais racional do que a otimização de um determinado fator como a análise de custo benefício (CBA), além de permitir uma visão de vários pontos de vista.

O MCDM é um ramo da pesquisa operacional útil quando se estuda problemas complexos que envolve diversos aspectos/critérios contraditórios que geram incertezas, que tornam difícil a tomada decisão sem o auxílio de ferramentas que possam explorar essas contradições. Essas ferramentas avaliam as vantagens e desvantagens de cada alternativa e resulta em um ranking da alternativa que possui o melhor desempenho em consideração aos diversos critérios envolvidos. Para isso, é necessário definir o objetivo claro da tomada de decisão, identificar as possíveis alternativas, avalia-las em relação as diversas perspectivas (critérios) que envolve o problema para distinguir as alternativas que são aceitáveis das não aceitáveis (JOVANOVIC *et al.*, 2016). De um modo geral o MCDM auxilia na compreensão e avaliação de situações complexas; promove um processo sistemático de tomada de decisão; recolhe as avaliações subjetivas dos peritos; avalia problemas complexos em diferentes aspectos; facilita a comunicação entre diferentes *stakeholders* (ARIKAN *et al.*, 2015).

A LCA (avaliação do ciclo de vida) é normalmente usada para avaliar aspectos ambientais e energéticos durante todo o ciclo de vida. Sua eficácia está relacionado a sua avaliação das entradas e saídas de um determinado sistema (CHERUBINI *et al.*, 2008). Dessa forma, ela consegue medir os recursos naturais necessários para o funcionamento do processo que podem ser, água, combustíveis, tipo de RSU, etc, e as saídas do processo que podem ser emissões atmosférica, emissões líquidas, produtos secundários, etc. Com um raciocínio semelhante ao LCA, o LCC (ciclo de vida de custeio) avalia por todo o período de vida os

balanços econômicos dos processos, considerando as entradas e saídas financeiras. Embora o LCA e o LCC sejam eficazes na contabilização de impactos, o MCDM é necessário para agregar os seus resultados (SOLTANI *et al.*, 2016).

2.4.1.1 FERRAMENTAS DE TOMADA DE DECISÃO NA GRSU

Nessa revisão foram identificados 48 artigos que aplicaram ferramentas de gestão para ajudar na compreensão do cenário e auxiliando na tomada de decisão. Desses, 23 trabalhos aplicaram uma ferramenta isolada, 21 combinou 2 ferramentas e 5 combinou uma análise com 3 ferramentas. Entre as ferramentas observadas, o AHP foi a mais usada aparecendo em 42% dos trabalhos, seguido pelo LCA aparecendo em 40%, o TOPSIS em 20% e PHOMETHEE em 16% (Figura 1.3).

A LCA foi aplicada em 20 dos 48 artigos estudados, na maioria das vezes com um viés ambiental. Em 12 trabalhos ela foi aplicada sozinha, e em 8 oportunidades um MCDM foi conciliado a ela. A aplicação de um MCDM com o LCA é justificado por ampliar as perspectivas de um problema complexo atribuindo pesos aos critérios de forma a priorizar critérios mais relevantes para uma determinada situação, levando em conta aspectos qualitativos importantes (KADAFI *et al.*, 2014).

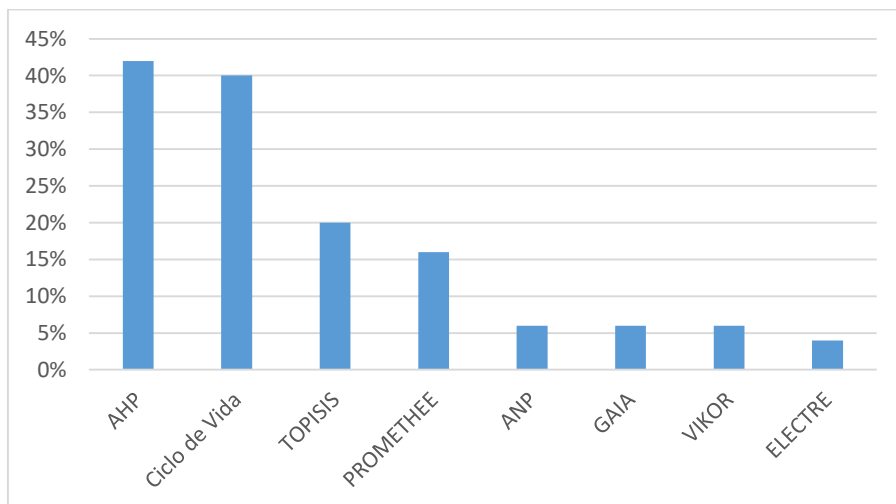


Figura 1.3: Frequência do uso de ferramentas na GRSU

A AHP foi observada em 21 trabalhos dos estudados. Sua alta frequência é explicada pela facilidade de aplicação. Ela é a ferramenta de MCDM mais popular entre os trabalhos científicos em diversas áreas (ARENA, 2012). A sua facilidade é atribuída as coletas de dados apenas por entrevistas, apesar dos problemas de inconsistência das respostas regularmente observados. Das 21 vezes aplicado, apenas 3 foram isoladas e 18 vezes foi combinada com outra ferramenta. Assim, o AHP é normalmente usado para atribuir pesos aos critérios e alternativas por um viés de peritos e *stakeholders*, capturando seus conhecimentos subjetivos (SOLTANI *et al.*, 2015). Dessa forma, é importante que *stakeholders* diferentes participe da coleta de dados para que diferentes perspectivas e interesses seja considerada.

O TOPSIS foi a terceira ferramenta mais usada na GRSU aparecendo em 10 trabalhos. Em todos os trabalhos ele foi combinado com uma outra ferramenta para atribuir pesos aos critérios. Apesar disso, uma análise de sensibilidade (alternar os pesos dos critérios) (PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015) possibilita uma ampliação do entendimento do problema além permite um alinhamento do objetivo da decisão em relação aos pesos dos critérios.

O PROMETHEE apresentou a quarta maior frequência de uso na GRSU aparecendo em 8 artigos, sendo que em 5 trabalhos ela foi combinada com outra ferramenta. Ela se diferencia dos outros métodos de tomada de decisão por não levar em conta apenas a comparação em pares dos critérios, normalmente visto, mas também a interação entre eles (ARIKAN *et al.*, 2017).

Cada uma dessas ferramentas possui pontos positivos e negativos. O AHP é utilizado principalmente para capturar os conhecimento e preferências subjetivas dos tomadores de decisão. Já o PROMETHEE e o TOPSIS conseguem recolher dados tanto a partir e entrevistas mensurando as respostas através de escalas de linguagem como de banco de dados. Por fim, o LCA possui uma abordagem fortemente quantitativa através da coleta de dados campo. Essas variações de natureza qualitativas e quantitativas entre as ferramentas permite a combinação delas para avaliar aspectos diferentes (SOLTANI *et al.*, 2015).

Como a aplicação dessas ferramentas já são bem descritas na literatura, decidimos não incluí-las nessa revisão. Para melhor entendimento dessa aplicação sugerimos a leitura de artigos que incluem a sua aplicação como (SOLTANI *et al.*, 2016) (LCA), (PIRES *et al.*, 2011) (AHP-TOPSIS), (LOLLI *et al.*, 2016) (PROMETHEE), entre outros.

2.4.1.2 RELAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS E OS OBJETIVOS

As diferentes abordagens das ferramentas de auxílio a decisão fazem com que elas tenham desempenhos diferentes em situações e objetivos diferentes. Por exemplo, o AHP é uma ferramenta de fácil aplicação que captura as informações subjetivas dos tomadores de decisão ajudando na interpretação dos critérios e alternativas. O PROMETHEE possui uma abordagem que levam em consideração a relação entre os critérios, coisa que o AHP não faz. A Tabela 1.1 procurou relacionar o objetivo principal dos artigos estudados com a ferramenta utilizada para tentar capturar alguma relação. Os objetivos principais dos artigos estudados foram definidos de acordo com o objetivo descrito no resumo de cada artigo.

Tabela 1.1: Frequência do uso de ferramentas pelos objetivos

Objetivos	AHP	LCA	TOPSIS	PROMETHEE	ANP	DEMATEL	GAIA	ELECTRE	VIKOR
Modelo de tomada de decisão	6,2%		4,2%	2,1%	4,2%	2,1%	2,1%		4,2%
Cooperação entre municípios				2,1%			2,1%		
Alternativa ou cenário adequado	22,9%	14,6%	14,6%	8,4%		2,1%			
Recuperação de produtos	10,4%	6,2%	2,1%	2,1%				2,1%	
Base na sustentabilidade	17%	10,4%	12,5%	18,8%	4,2%		4,2%		4,2%
Ambiental	2,1%	12,5%		2,1%			2,1%		
Ambiental e Econômico	4,2%	6,2%	4,2%		2,1%				2,1%
Redução de resíduos	2,1%	2,1%	2,1%						
Simbiose com a indústria		2,1%							

Ferramentas de Tomada de Decisão Multicriterial: *AHP*: *Analytic Hierarchy Process*; *LCA*: *Life Cycle Assessment*; *TOPSIS*: *Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*; *PROMETHEE*: *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*; *ANP*: *Analytic Network Process*; *DEMATEL*; *GAIA*; *ELECTRE*; *VIKOR*.

De uma forma geral, as ferramentas são distribuídas uniformemente entre os objetivos da GRSU. O AHP, por ser a ferramenta mais popular, se destaca na maioria dos objetivos estudados. Entretanto, podemos perceber que o PROMETHEE teve maior porcentagem dos trabalhos relacionado com a sustentabilidade. Isso ocorre justamente pela natureza do método de mensurar a interação entre os critérios (ARIKAN *et al*, 2017), priorizando trabalhos que

avalia o *triple bottom line* da sustentabilidade, confirmada por não apresentar trabalhos que focam apenas nos aspectos ambientais ou ambientais e econômicos juntos.

Diferente do LCA, que apesar de ter tido a maior frequência de sua aplicação na seleção de uma alternativa/cenário ideal, se destaca com maior frequência em trabalhos focados nos aspectos ambientais, que é seu enfoque principal (SOLTANI *et al.*, 2016). Quando se trata da recuperação de energia e redução de resíduos, é interessante o incentivo do uso de ferramentas baseados em dados mais quantitativos por se tratar de parâmetros quantitativos. A alta frequência do uso do AHP na recuperação de produtos demonstra a tendência desse parâmetro, mas uma abordagem subjetiva para questões quantitativas devem ser só o começo da investigação (SOLTANI *et al.*, 2015).

2.4.2 GESTÃO INTEGRADA

A gestão integrada busca combinar processos e alternativas de tratamento para chegar a uma maior eficiência de recuperação, tratamento e valorização dos resíduos. As alternativas de GRSU possuem desempenho de redução de resíduos diferentes para tipos de resíduos diferentes. Assim, a gestão integrada busca mesclar essas alternativas direcionando cada tipo de resíduo para a alternativa adequada de tratamento formando um cenário de GRSU. Em um cenário onde existe a separação de orgânicos e inorgânicos, seja ela por separação na fonte ou em estações de triagem, a fração orgânica é direcionada para estações de compostagem, digestão anaeróbica, pirólise ou gaseificação, e a fração inorgânica é direcionada para algum tratamento térmico, reciclagem ou disposição final direto. Assim, consegue-se um maior volume de redução de resíduos e ainda, recupera materiais recicláveis e produz combustíveis (MIR *et al.*, 2016). Entretanto, a gestão integrada de alternativas de tratamento de RSU é um desafio para uma gestão sustentável (YAY, 2015; DONG *et al.*, 2014).

Apesar da gestão integrada possuir diversos benefícios como a possibilidade de mais de 90% de redução do volume destinado a disposição final, ela também possui algumas dificuldades. É necessário um suporte aos envolvidos economicamente como catadores que acabam perdendo mercado evitando assim uma reprovação social de sua implementação. A gestão integrada possui uma maior capacidade de emissões de alguns compostos (NO_x, PM₁₀, metais pesados, HPA, entre outros) em escala de planta que outras tecnologias. Além disso,

dependendo do cenário, existe a necessidade de um aumento de 20% de consumo de combustíveis fósseis para tratar os RSU, apesar de ter a capacidade de recuperar uma energia (15,5% da eletricidade e 8,2% de gás natural da cidade de Roma) considerável (CHERUBINI *et al.*, 2008). Uma outra barreira é a comercialização dos produtos secundários (basicamente adubo e energia) que não possuem um mercado estabelecido na maioria dos locais (YAP; NIXON, 2015; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015). E para finalizar, os custos de uma gestão integrada é consideravelmente maior (YAP; NIXON, 2015).

Alguns trabalhos sugerem que alternativas como a compostagem e digestão anaeróbica tem a capacidade de reduzir totalmente a geração de resíduos orgânicos (MIR *et al.*, 2016). E considerando as alternativas com prioridades em inorgânicos como reciclagens e tratamentos térmicos que possui alta capacidade de redução dos resíduos, percebemos que a gestão integrada nos aproxima da estratégia Emissão Zero baseadas nos ciclos naturais e favorece a economia circular (CHERUBINI *et al.*, 2008).

2.4.3 CENÁRIOS IDEAIS

Apesar de um dos principais objetivos da GRSU ser descontinuar o uso do aterro, o caminho para abandoná-lo é longo, o tornando útil até a implementação de cenários que utilizam todo o volume de resíduos em processos de redução, reaproveitamento e reciclagem. A triagem também é um processo decisivo em um cenário integrado, facilitando a divisão dos grupos de resíduos. Quanto mais tecnologia combinadas, maior vai ser o volume de resíduos reduzidos e maior será a recuperação de produtos (JOVANOVIĆ *et al.*, 2016). O problema de combinar muitas tecnologias é o elevado custo inicial, inviabilizando a implementação. Assim, devemos nos atentar na sequência da implementação das tecnologias até construir o cenário ideal, diluindo a implementação e os custos. Essa sequência de implementação precisa ser baseada primeiramente nos benefícios de redução e recuperação de resíduos, com baixo impacto ambiental e social e que seja compatível com as condições financeiras, infraestrutura, composição dos resíduos e objetivos dos municípios, além de alinhada aos *stakeholders*.

Em um cenário integrado com a combinação dos principais processos e tecnologias de GRSU (Figura 1.4) a triagem poderia começar nas residências proporcionando menores custos e estimulando a conscientização da população ou feita em estações de triagem. Com a separação

da fração orgânica da fração inorgânica dos RSU cada um seguirá um destino diferente. A fração orgânica seguirá uma parte para o digestor anaeróbico (DA) onde acontecerá a fermentação para produção de energia, que será comercializada ou usada na produção de energia elétrica. Os resíduos da DA seguirão com uma parte dos RSU orgânicos da fonte para uma estação de compostagem que transformará parte desses resíduos em matéria rica em nutrientes que será comercializada na forma de adubo. Os resíduos destes processos se juntarão com restos não aproveitados da fração inorgânica na pirólise/gaseificador.

A fração inorgânica dos RSU vão para uma estação de triagem para reciclagem, onde os grupos de materiais inorgânicos serão separados para uma possível comercialização. Dos compostos que não seguir a reciclagem, os que tiverem alta concentração de carbono em suas moléculas se juntarão aos resíduos dos processos biológicos ao gaseificador/pirólise (redução de até 95%). O gaseificador/pirólise são preferidos que o incinerador por possuir maior eficiência na recuperação de energia e nos impactos ambientais que o incinerador. As substâncias que não forem reaproveitadas seguirão o caminho em direção ao incinerador WtE, caso necessário. Os resíduos do gaseificador/pirólise podem ser usados como adubos por sua riqueza de matéria orgânica. Os gases (CH₄) produzidos desse processo podem ser comercializados ou usados para geração de energia elétrica. As cinzas do incinerador, se for necessário sua implementação, seguirão o caminho para o aterro sanitário ou poderão ser utilizadas nas indústrias de materiais de construção (LI *et al.*, 2012; LODEIRO *et al.*, 2016). Caso tenha algum resíduo destes processos, estes serão encaminhados ao aterros.

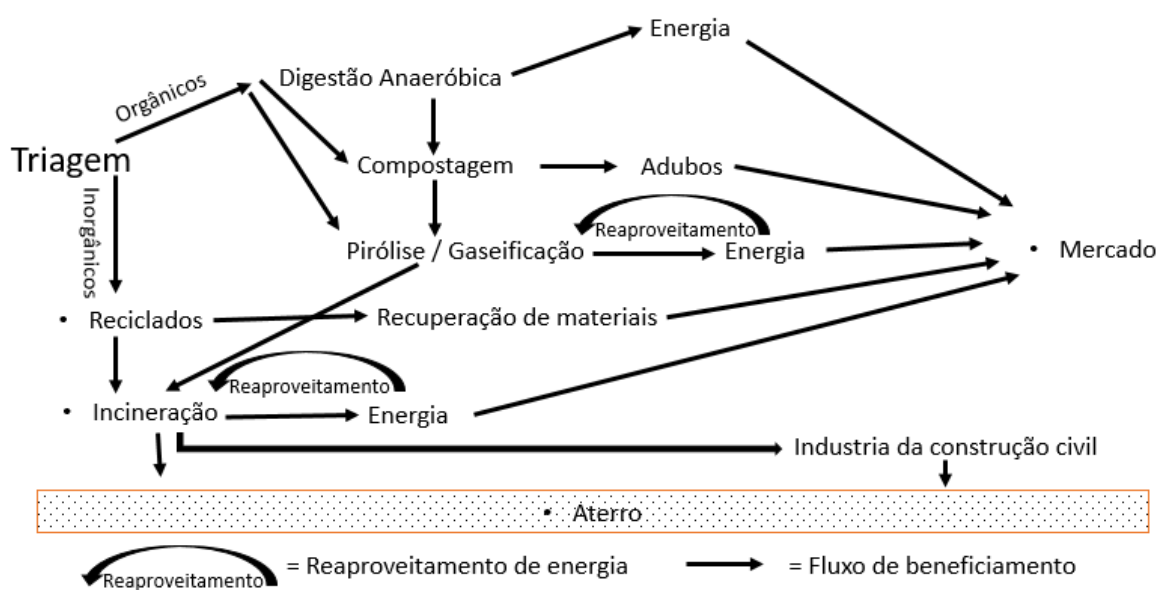


Figura 1.4: Gestão integrada

Esse cenário procurou combinar todas as principais alternativas de GRSU em um cenário integrado. Porém, pode não ser viável implementar alguma dessas tecnologias como o incinerador, por exemplo, pois o volume e a composição destinada não seria adequada para garantir a viabilidade de sua implementação. Outro possível mudança seria a implementação apenas do gaseificador para a redução da fração orgânica dos RSU economizando na implementação da compostagem e da DA. Dessa forma, a busca por um cenário integrado variará de acordo com os aspectos da região como situação financeira, volume, caracterização de resíduos, etc. Sendo assim, é necessário mais estudos sobre a combinação dessas tecnologias.

Uma análise de sensibilidade poderá ser feito de acordo com as principais barreiras e objetivos encontrados, para assim, identificar o caminho crítico de implementação dos processos e tecnologias buscando a gestão integrada. Essa análise pode contribuir com a identificação da sequência mais barata no início da implementação, ou com maior redução de orgânicos, ou inorgânicos, ou com maior recuperação de energia, etc.

2.4.4 ALTERNATIVAS E CENÁRIOS DA GRSU

Dentre os processos da GRSU as alternativas de tratamento, recuperação e disposição final são os processos mais complexos. Pode-se dividir essas alternativas de tratamento de RSU em quatro categorias: Disposição final; sistemas biológicos; sistemas térmicos; recuperação (ARIKAN *et al.*, 2015). Dentre elas, a mais comum utilizada no mundo é a disposição final na forma em aterros devido a seu baixo custo e a capacidade de receber resíduos variados (YAP; NIXON, 2015). Porém, devido à grande demanda de terra que o aterro exige potencializada pela tendência de aumento na produção dos RSU (DONG *et al.*, 2014; SONG *et al.*, 2013; DONG *et al.*, 2014), juntamente com a valorização das terras próximas as cidades, os impactos ambientais, sociais e a baixa capacidade de recuperação dos resíduos, motivou a busca por alternativas que contribuem com um melhor desempenho nesses aspectos, minimizando a dependência dos aterros. Sendo assim, essas novas tecnologias passam a compor um cenário de GRSU, juntamente com o aterro, onde cada tecnologia assume um grupo de resíduos a serem processados. Quanto mais alternativas forem empregadas na GRSU, maiores serão os volumes reduzidos para deposição em aterros, entretanto, maiores serão os custos iniciais (JOVANOVIC *et al.*, 2016). Sendo assim, uma separação dos resíduos passa a ser um processo de grande

importância em cenários com mais de uma alternativa para destinar o resíduo a tecnologia adequada.

A triagem dos RSU pode ser aplicada por meio de uma coleta seletiva, onde os tipos de resíduos são coletados separadamente na fonte ou feito uma separação em estações de triagem. A melhor opção depende das condições de infraestrutura do local (VUCIJAKA *et al.*, 2014) e até mesmo da cultura da região. Segundo (SU *et al.*, 2010) a triagem é o processo mais importante para garantir a recuperação e redução dos resíduos nas diversas alternativas.

2.4.4.1 FREQUÊNCIA EM CENÁRIOS IDEAIS

A maioria dos trabalhos em que essa revisão se baseou, tinha como objetivo selecionar uma alternativa/cenário de tratamento de RSU sustentável. Juntando as informações desses trabalhos foi possível construir as Figuras 1.5 e 1.6. Podemos observar na Figura 1.5, que a reciclagem é a alternativa que mais aparece em cenários ideais, seguido por aterro sanitário e digestão anaeróbica empatados, compostagem, incineração e por último a gaseificação. Esse resultado demonstra a dificuldade mundial em abandonar os aterros, apesar da Suíça comprovar essa possibilidade (MANCINI *et al.* 2012). Podemos observar também que a maioria dos trabalhos priorizam cenários com a integração de tecnologia focando na recuperação de algum tipo de produto, principalmente energia.

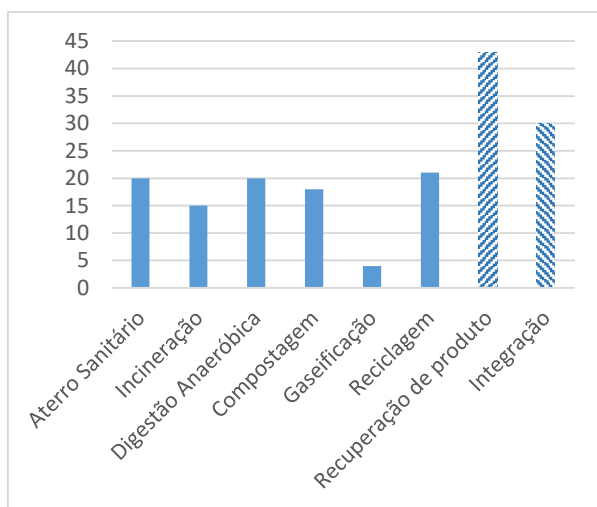


Figura 1.5: Frequência que as alternativas ocuparam a 1º preferência nos trabalhos estudados

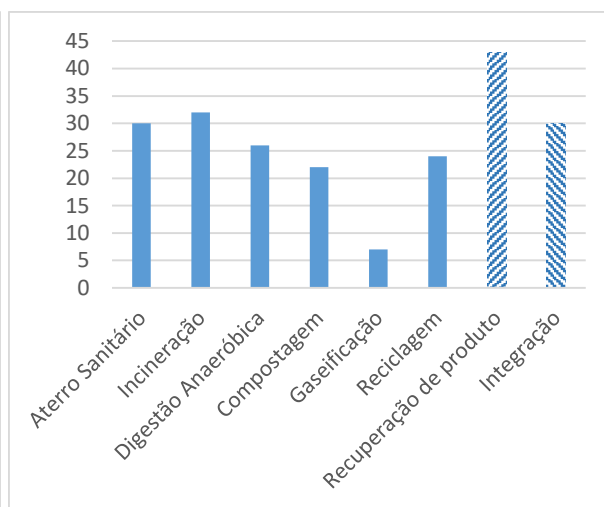


Figura 1.6: Frequência que as alternativas ocuparam a 1º e 2º preferências somadas

A incineração, apesar de se posicionar em 5º colocação de alternativas com primeira preferência, quando somado com a sua frequência de segunda preferência, ela passa a ser a 1º tecnologia com maior frequência em cenário ideais (Figura 1.6). Esse resultado pode ser explicado pelo mau desempenho ambiental e altos investimentos que a incineração possui (SONGA *et al.*, 2013) em contra partida com a grande capacidade de reduzir volume de resíduos inorgânico. Assim, apesar dos pontos negativos, a incineração continua a ter uma boa preferência, principalmente por ser, juntamente com a reciclagem, uma alternativa aos resíduos inorgânicos.

As tecnologias especializadas na redução de resíduos orgânicos apresentam, de um modo geral, um bom desempenho ambiental. A digestão anaeróbica, por não ser cara e possuir uma boa capacidade de recuperação foi a melhor alternativa entre elas (YAP; NIXON, 2015), seguida pela compostagem por ser a alternativa mais barata e com uma certa capacidade de recuperação de produtos (SONGA *et al.*, 2013). A gaseificação, apesar de apresentar bom desempenho ambiental, de recuperação de produtos e redução dos resíduos que podem viabilizar o orçamento operacional, é a tecnologia mais cara entre elas e menos conhecida, o que pode explicar seu baixo desempenho entre os estudos (YAP; NIXON, 2015).

Assim, fica claro que a combinação de tecnologias hoje, apresenta um melhor desempenho de recuperação, redução e valorização dos resíduos por explorar os pontos positivos de cada tecnologia, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais.

2.4.5 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS ENVOLVIDOS NA GRSU

A GRSU é um problema complexo que envolve diferentes critérios. O MCDM é uma ferramenta importante no auxílio da resolução de problemas desse tipo. Para a aplicação dos MCDM, primeiramente é preciso definir o objetivo da decisão, eleger os critérios envolvidos no problema e definir as alternativas para alcançar o objetivo. Dessa forma, um problema pode ser avaliado a partir de diversos aspectos, dependendo dos critérios escolhidos de acordo com o objetivo. A Tabela 1.2 representa os critérios envolvidos na GRSU encontrados na literatura.

A partir dos anos 1990, com políticas públicas mais rígidas em relação aos resíduos, vieram estudos considerando mais fatores com análises mais profundas, diversificando os

critérios e as alternativas (TSENG, 2009). Os critérios envolvidos na GRSU sustentável podem ser classificados como ambientais, econômicos, sociais, técnicos, políticos e administrativo, como pode ser visto na Figura 1.7. Para estratificação dos critérios, nós consideramos os subcritérios ambientais aqueles que estão diretamente ligados as perturbações ambientais (biótico e abiótico). Os subcritérios econômicos foram selecionados por questões de valores, patrimoniais e financeiros. Os subcritérios sociais forma separados por se tratarem de relações sociais entre classes, grupos, entidades, entre outros, ou por índices sociais como o IDH ou PIB. Os critérios técnicos representam características das tecnologias sem levar em conta sua eficiência. Já os critérios políticos envolve questões legislativas e relações políticas. E finalmente, os critérios administrativos foram separados por sua característica de gerenciamento e tomada de decisão na GRSU.

Tabela 1.2: Critérios observados na literatura

Abrangência dos tipos de resíduos	Aceitação social	Acidificação	Adoção da solução consorciada	Alteração de habitat	Ambiental
Apoio Político	Aquecimento Global	Bem estar social	Condições de trabalho	Conformidade legal	Consumo de recursos
Controle da poluição do ar	Controle do orçamento	Custo inicial	Custo manutenção	Custo operacional	Custo pré tratamento
Custo total	Demanda de gestão	Demanda de Terra	Desenvolvimento do mercado	Destruição do ozônio	Disponibilidade tecnológica
Educação	Eficiência Técnica	Eficiência Econômica para a população	Energia bruta utilizada	Envolvimento da comunidade	Esgotamento de combustíveis fosseis
Eutrofização	Flexibilidade	Fundos de apoio	Geração de empregos	IDH	Impacto ecológico
Independência de outras Tecnologias	Justiça Social	Localização	Lucro liquido	Manutenção	Maturidade
Maturidade Tecnológica	Odor	Operação funcionalidade	Oxidação fotoquímica	PIB	Poluição
Poluição atmosférica	Poluição do solo	Poluição dos recursos hídricos	Poluição sonora	Poluição Visual	Prazos de implementação
Prazos de Progressos	Pré tratamento	Prevalência do uso	Procedimento administrativos	Processo contínuo	Radiação
Receita com produtos secundários	Recuperação de resíduos	Redução de resíduos	Requisitos de infraestrutura	Retorno político	RH qualificados
Saúde humana	Separação dos resíduos	Social/cultural	Taxa paga pela população	Técnico	Transporte
Viabilidade energética	Viabilidade financeira/ Econômico	Viabilidade Geral			

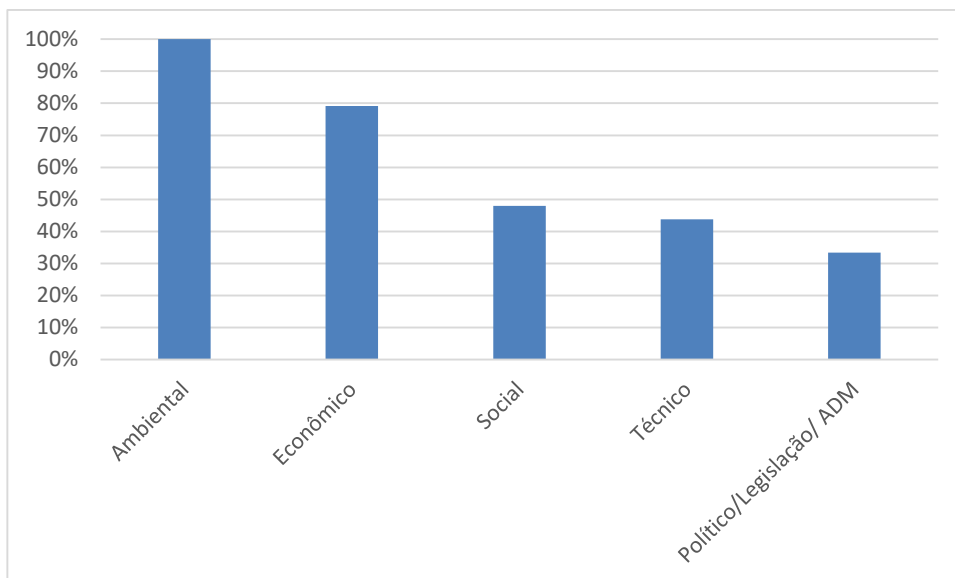


Figura 1.7: Principais critérios envolvidos com a GRSU

De acordo com a estratificação que propomos, todos os trabalhos pesquisados avaliavam de alguma forma os aspectos ambientais da GRSU. Os aspectos econômicos foram avaliados em 79% dos trabalhos, os sociais em 48%, os técnicos em 44% e os políticos administrativos em 33%.

Além dos critérios ambientais serem os mais frequentes na literatura eles também são os que possuem mais subcritérios (Figura 1.8) que muitas vezes não são selecionados de uma forma clara e sistemática (NIEMEIJER; GROOT, 2008). Alguns desses subcritérios se relacionam fortemente com critérios técnicos, como por exemplo, em relação a capacidade de redução dos resíduos ou a eficiência de recuperação de energia das alternativas estudadas. Os critérios ambientais também relacionam com aspectos sociais como a saúde humana, poluição visual, sonora, etc. Os subcritérios econômicos também já foram bem explorados, porém não possui um meio tão complexo como o ambiental em termos de subcritério. Eles estão bem estabelecidos envolvendo variedade de termos baseados em custos e receitas. Eles podem se relacionar com aspectos sociais na geração de emprego, por exemplo. Os subcritérios sociais foram menos explorados devido à dificuldade de definição e mensuração. Porém, como visto na Figura 1.7, a avaliação dos aspectos sociais possui uma alta frequência, comprovando sua importância.

Os subcritérios técnicos possui uma frequência parecida com o social. Esses critérios se relacionam fortemente com os aspectos ambientais relacionados a impactos ambientais, aspectos econômicos em relação com a capacidade de recuperação de produtos com valor agregado ou com aspectos sociais na geração de emprego. Os subcritérios Políticos/ADM são

poucos explorados e aplicados até o momento. Eles se relacionam com critérios ambientais na regulamentação ambiental e com os critérios sociais no envolvimento da sociedade, harmonização com o legislativo ou com grupos ambientais. Por fim, os subcritérios Administrativos se relaciona com todos por serem critérios envolvidos diretamente na tomada de decisão, que afeta todos os critérios. Assim sendo, percebemos que todos esses critérios se interagem entre si, podendo ser classificados de diferentes formas em estudos diferentes.

Esses critérios foram classificados em ambientais, econômicos, sociais, técnicos, políticos e administrativo. A Figura 1.8 representa as variações de subcritérios encontrados no artigos pesquisados de acordo com sua classificação.

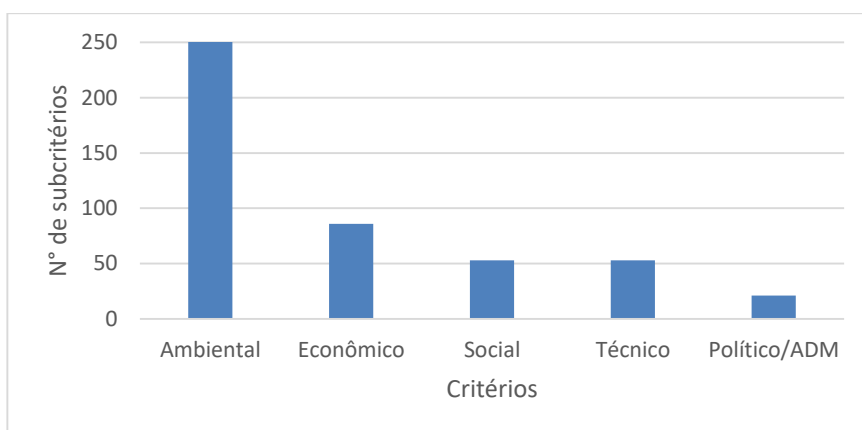


Figura 1.8: Número de subcritérios

Podemos perceber na Figura 1.9, que o subcritério ambiental mais frequentes são a “Saúde humana” (46%) seguidos por “Consumo de recursos” (40%), “Redução dos resíduos” e “Aquecimento global” com mesma frequência (35%) e “Poluição atmosférica” e “Poluição dos recursos hídricos” também empatados (33%).

A “Saúde humana” (46%) representa tanto o próprio termo, como também “Toxicologia humana” (BANAR *et al.*, 2009). O “Consumo de recursos” (40%) também envolve a “Ingestão de água” (33%) visto em alguns trabalhos (SOLTANI *et al.*, 2016; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015). A “Redução dos resíduos” (35%) e a “Recuperação dos resíduos” (31%) estão envolvidos na mesma etapa, demonstrando a importância de estabelecê-la. Podemos perceber também uma preocupação em relação a poluições atmosféricas que foram representadas pelos subcritérios “Aquecimento global” (35%), “Poluição atmosférica” (33%), “Controle da poluição do ar” (15%), “Destrução do ozônio” (10%). Essa preocupação pode ser explicada pelas emissões das alternativas que estão relacionados ao aquecimento global, chuvas ácidas e

emissões de substâncias tóxicas (KOLLIKATHARA *et al.*, 2009). A alta frequência do subcritério “Poluição dos recursos hídricos” (33%) pode estar relacionado com um dos principais impactos ambientais do lixão ou aterros através da poluição de lençóis freáticos e águas superficiais.

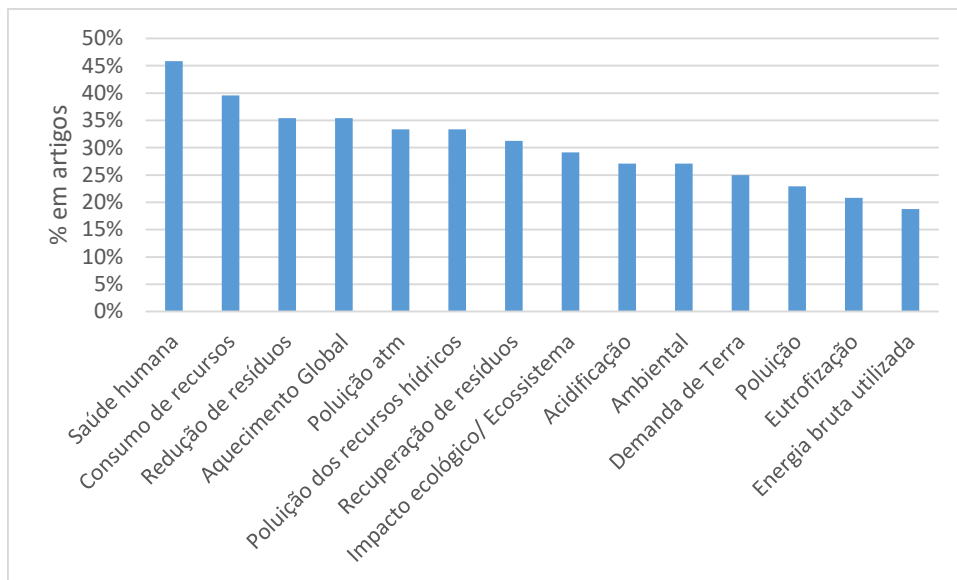


Figura 1.9: Frequência dos subcritérios ambientais mais vistos

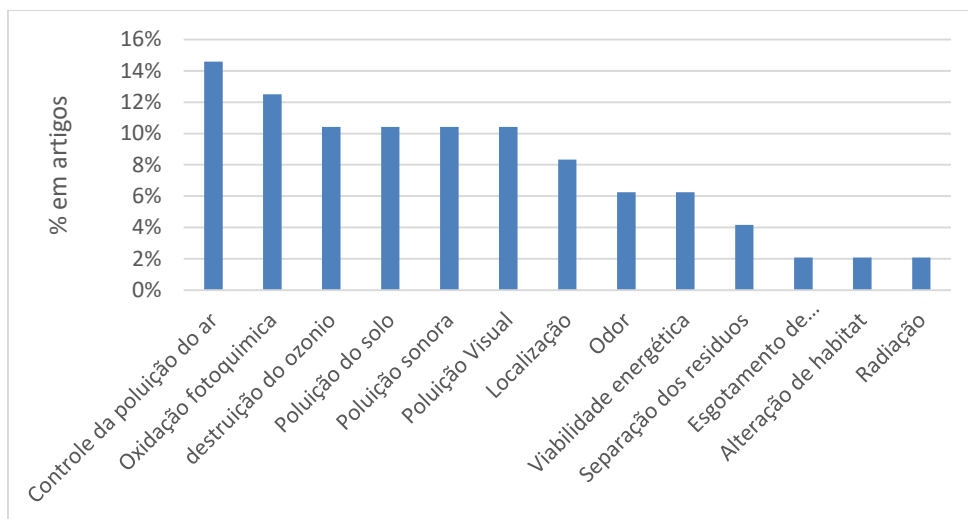


Figura 1.10: Frequência dos subcritérios ambientais menos vistos

Todos esses subcritérios representam de alguma forma um impacto ambiental, que pode ser representado como um subcritério “impacto ecológico”. Por esse critério ser mais genérico, ele é normalmente aplicados em trabalhos que utilizam o AHP que captura a importância subjetiva do entrevistado (YAP; NIXON, 2015; SOLTANI *et al.*, 2016; MANAF *et al.*, 2008; KHARAT *et al.*, 2016; THAMPI; RAO, 2015).

Podemos observar na Figura 1.11 que “custo inicial” (50%) e “custo operacional” (42%) são os subcritérios mais consolidados do critério econômico da GRSU. O “custo inicial” muitas vezes desconsidera o valor do terreno de implementação (NOURI *et al.*, 2014; ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; SU *et al.*, 2010; DONG *et al.*, 2014), outros a consideram (INGLEZAKIS *et al.*, 2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2016) e outros a consideram como um subcritério a parte (MAKAN *et al.*, 2003; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015). O “custo operacional” pode envolver também o custo de manutenção (ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; LIMA *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2014) ou não (ARIKANA *et al.*, 2015; MIR *et al.*, 2016; VUCIJAK *et al.*, 2014). Outro subcritério que se destacou foi a “receita com produtos secundários” (17%). Apesar desse subcritério aparecer 2003 (MAKAN; MOUNTADAR, 2013) dentre os artigos pesquisados, ele passou a ser mais usado a partir de 2011, demonstrando uma tendência na GRSU de forma a viabilizar os tratamentos de RSU. Uma outra questão que cerca os subcritérios econômicos é a baixa frequência dos “fundos de apoio” (2%) e “desenvolvimento de mercado” (2%), sendo que, como já foi descrito, os principais problemas na GRSU é a falta de apoio financeiro (GUERRERO *et al.* 2013) e o estabelecimento de mercados para os produtos recuperados dos processos de tratamento (YAP; NIXON, 2015; LIU *et al.*, 2013).

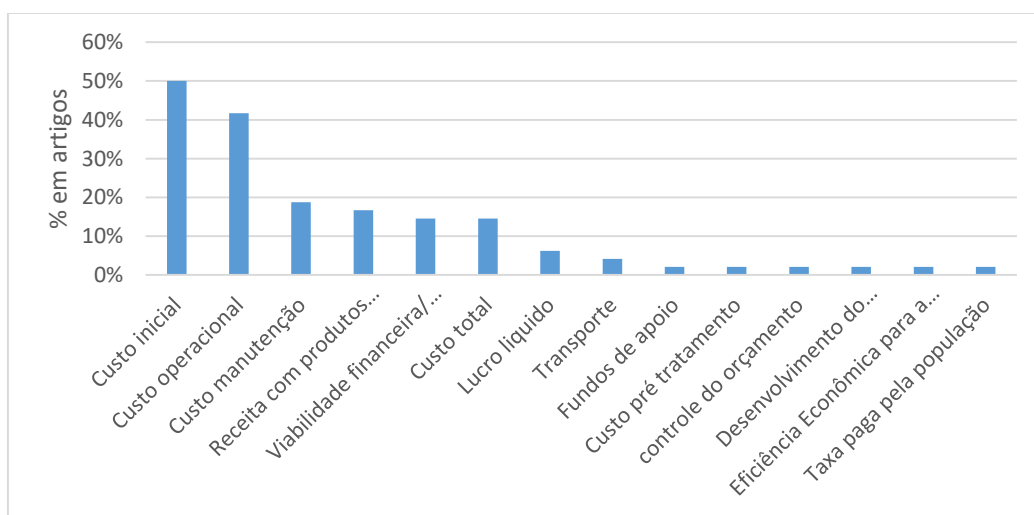


Figura 1.11: Frequência de subcritérios econômicos

Os subcritérios que envolve aspectos sociais que mais aparecem na GRSU é a “Aceitação social” (31%) e “Geração de emprego” (27%) (Figura 1.12). A “geração de empregos” normalmente representada como subcritério social (ARIKANA *et al.*, 2015; EKMEKÇIOGLU *et al.*, 2010; ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; LOLLI *et al.*, 2016; ARENA *et al.*, 2003; VUCIJAKA *et al.*, 2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2016; KHARAT *et al.*, 2016;

THAMPI; RAO, 2015; MAKAN *et al.*, 2003; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015) também pode representar um subcritério econômico (BABALOLA, 2015).

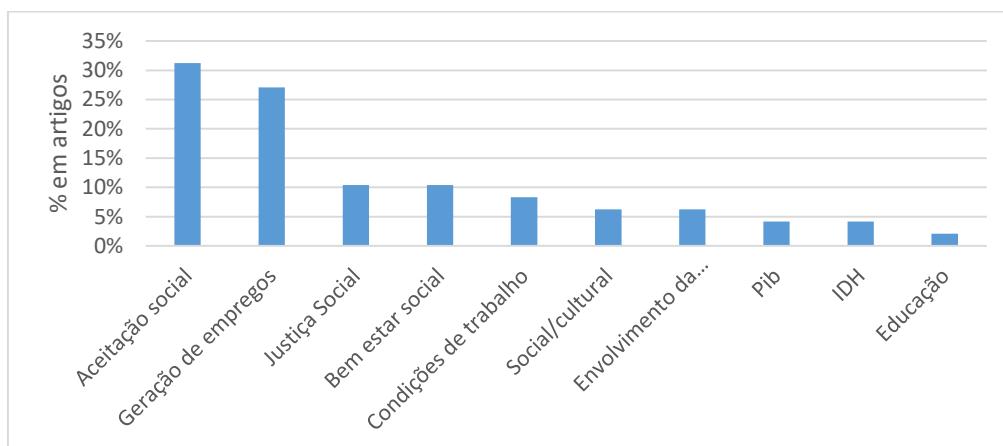


Figura 1.12: Frequência de subcritérios sociais

Dentre os subcritérios técnicos (Figura 1.13), se destacaram o “R.H. qualificado” (25%) e “Maturidade Tecnológica” (21%). O “RH qualificado” é um subcritério importante para garantir a eficiência do processo e contribuir com a disseminação de conhecimento relacionado aos problemas dos RSU, sendo que essa falta de conhecimento também é uma das barreiras enfrentadas na GRSU. A “Maturidade tecnológica” é importante para atribuir confiança na implementação da tecnologia, sendo que os investimentos e riscos atribuídos são altos.

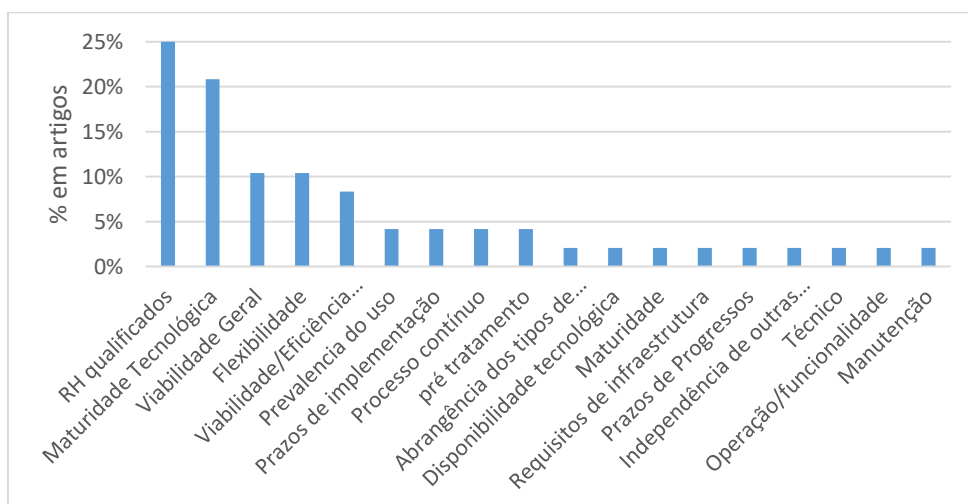


Figura 1.13: Frequência de subcritérios técnicos

A “Conformidade legal” (23%) é o subcritério político (Figura 1.14) mais visto seguido por “Apoio político” (8%). A “Conformidade legal” pode se enquadrar tanto como subcritério social (MAKAN; MOUNTADAR, 2013; VUCIJAKA *et al.*, 2014; MAKAN *et al.*, 2003) e como subcritério político (INGLEZAKIS *et al.*, 2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2016).

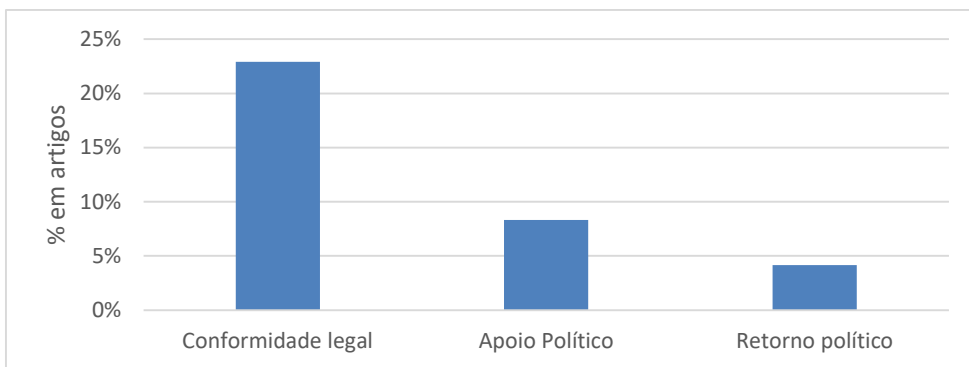


Figura 1.14: Subcritérios políticos

Os subcritérios Administrativos (Figura 1.15) vistos foram “Adoção de soluções consorciadas” (4%), “Procedimentos administrativos” (2%) e “Demanda de gestão” (2%).

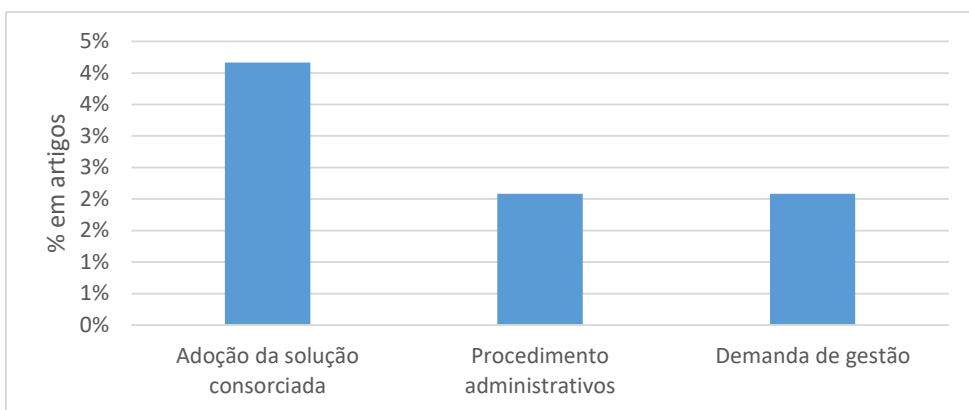


Figura 1.15: Subcritérios administrativos

Um mesmo critério pode representar e ser representado de diferentes maneiras na literatura. Por exemplo, a “saúde humana” além de ser normalmente representada dessa forma (HUNG *et al.*, 2007; TSENG, 2009; YAP; NIXON, 2015; NOURI *et al.*, 2014; LIUA *et al.*, 2013) (HANANDEH; EL-ZEIN, 2010; LOLLI *et al.*, 2016; ULUKAN; KOP, 2009; SONG *et al.*, 2013; SAMAH *et al.*, 2011; VUCIJAKA *et al.*, 2014; KHAN *et al.*, 2008; KHARAT *et al.*, 2016; THAMPI; RAO, 2015), também foi representada como “toxicidade humana” (BANAR *et al.*, 2009), ou como “exposição a patógenos” (BABALOLA, 2015) e até como “cancerosa” e “não cancerosa” (SOLTANI *et al.*, 2016). Além disso a “saúde humana” que normalmente é vista como subcritérios ambiental, também foi classificado como subcritérios social (INGLEZAKIS *et al.*, 2014; VUCIJAKA *et al.*, 2014). A “localização” pode ser vista como subcritério ambiental (KHAN *et al.*, 2008; THAMPI; RAO, 2015) representando o impacto do transporte dos resíduos ou como subcritério social (VEGO *et al.*, 2008; SAMAH *et al.*, 2011), representando o impacto da instalação nas proximidades de regiões povoadas.

Outro subcritério que possui variações quanto a sua definição é a “emissões atmosféricas” que pode representar qualquer tipo de emissão (ARIKANA *et al.*, 2015; NIXONA *et al.*, 2013; YAP; NIXON, 2015; SOLTANI *et al.*, 2016; GENG *et al.*, 2010; SONG *et al.*, 2013; MAKAN; MOUNTADAR, 2013; INGLEZAKIS *et al.*, 2014; PERKOULIDISA *et al.*, 2010; MAKAN *et al.*, 2003; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015) também pode ser dividido em material particulado e gases (JOVANOVIC *et al.*, 2016) ou em poeira e matéria orgânica (HERVA; ROCA, 2013) e até divididos em orgânicos e inorgânicos (LOLLI *et al.*, 2016). Em muitos trabalhos, problemas específicos das emissões atmosféricas são separados do critério “emissões atmosféricas” como o “aquecimento global” (SOLTANI *et al.*, 2016; PIRES *et al.*, 2011; EKMEKÇIOGLU *et al.*, 2010; TAN *et al.*, 2014; ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; PANDYASWARGO *et al.*, 2012; HANANDEH; EL-ZEIN, 2010; BANAR *et al.*, 2009; ÖZELER *et al.*, 2006; ZAMAN, 2010; ERIKSSONA *et al.*, 2005; CHERUBINI *et al.*, 2009; INGLEZAKIS *et al.*, 2016; YAY, 2015; PERKOULIDISA *et al.*, 2010; JOVANOVIC *et al.*, 2016; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015) e a “destruição da camada de ozônio” (SOLTANI *et al.*, 2016; PANDYASWARGO *et al.*, 2012; LOLLI *et al.*, 2016; ZAMAN, 2010; YAY, 2015).

Os subcritérios “redução de resíduos” e “recuperação de recursos” se relacionam fortemente com critérios ambientais, econômico e técnicos. A “redução de resíduos” que se refere a redução do volume dos resíduos, foi classificado como subcritério ambiental (NIXONA *et al.*, 2013; NOURI *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2013; VUCIJAKA *et al.*, 2014; JOVANOVIC *et al.*, 2016) ou como subcritério técnico (HERVA; ROCA, 2013; HANANDEH; EL-ZEIN, 2010; GENG *et al.*, 2010; PERKOULIDISA *et al.*, 2010). A “recuperação de recursos” que se refere a recuperação de energia e materiais (BABALOLA, 2015) e (KHARAT *et al.*, 2016), em muitos trabalhos representa apenas a recuperação de energia (NIXONA *et al.*, 2013; DONG *et al.*, 2014; TAN *et al.*, 2014; HANANDEH; EL-ZEIN, 2010; ÖZELER *et al.*, 2006). Além disso a “recuperação de recursos” pode ser classificada como critério Ambiental (TAN *et al.*, 2014; SONG *et al.*, 2013; VUCIJAKA *et al.*, 2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2016), técnico (ARIKANA *et al.*, 2015; TARMUDI *et al.*, 2010; TAN *et al.*, 2014) e econômico representado como “receita de produtos” ou “comercialização de produtos” (HUNG *et al.*, 2007; YAP; NIXON, 2015; PIRES *et al.*, 2011; TARMUDI *et al.*, 2010; MANAF *et al.*, 2008; SAMAH *et al.*, 2011; MAKAN; MOUNTADAR, 2013; VUCIJAKA *et al.*, 2014; THAMPI; RAO, 2015; MAKAN *et al.*, 2013; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015).

Podemos perceber que existe diversas formas de organizar e interpretar os critérios envolvidos na GRSU devido as suas relações e influências. Essa organização está relacionado

com os objetivos da decisão. Assim, de forma ilustrativa, produzimos a Figura 1.16, que representa uma matriz de decisão dos critérios mais frequentes na GRSU dos trabalhos estudados.

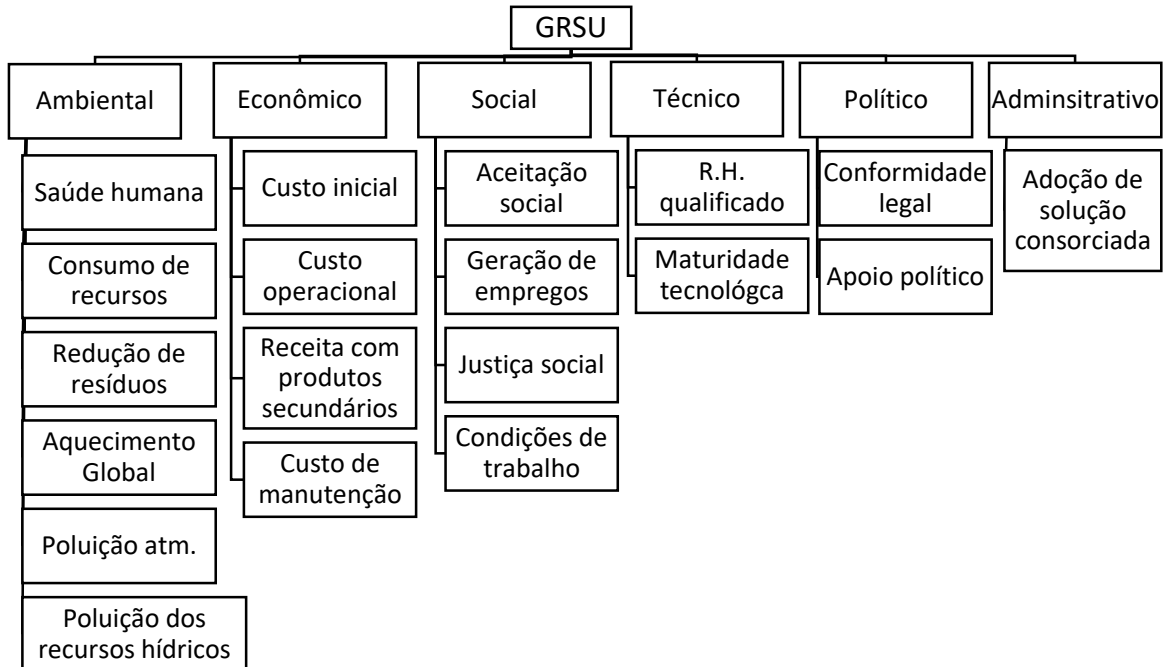


Figura 1.16: Matriz ilustrativa dos critérios mais frequentes dessa revisão

2.5 CONCLUSÕES

A GRSU procura reduzir os diversos problemas relacionados com o crescimento da produção dos RSU trazendo ganhos ambientais, econômicos e sociais. Assim os municípios podem consistentemente planejar suas ações para combater problemas específicos buscando atingir seus objetivos. As principais ferramentas utilizadas para auxiliar na GRSU é a LCA, AHP, TOPSIS e PROMETHEE. A combinação entre duas delas ou mais é benéfica por combinar vantagens distintas entre elas.

Os critérios envolvidos nessa GRSU variam de acordo com os objetivos dos estudos, sendo eles principalmente a busca por uma GRSU sustentável. Dessa forma, os principais subcritérios envolvidos são as “emissões atmosféricas”, “redução de resíduos”, “saúde humana”, “consumo de recursos”, “emissões”, “custo inicial”, “custo operacional”, “receita com produtos secundários”, “aceitação social”, “geração de emprego”, “demanda de terra”,

“recuperação de produtos”, “RH qualificado”, “harmonização com o quadro legislativo” e “apoio político”. Esses subcritérios pode se enquadrar nos critérios ambientais, econômicos, sociais, técnicos e político administrativo de diferentes formas de acordo com a interpretação e objetivos do tomador de decisão.

Levando em consideração essa revisão, foi observado que a gestão integrada é uma tendência por obter um maior volume de redução dos resíduos, maior recuperação de materiais e produtos secundários, aproximando a GRSU a estratégia Emissão Zero, baseada nos ciclos naturais (CHERUBINI *et al.*, 2008). Essas vantagens se esbarra nas dificuldades de implementação devido à complexidade do problema, de implementação, falta de conhecimento técnico pelos tomadores de decisão, conscientização da população, falta de apoio governamental, de mercado para os produtos secundários, de recursos financeiros e de infraestrutura. Assim sendo, é preciso que além de definir uma sequência de implementação de tecnologias buscando a gestão integrada de acordo os aspectos regionais, os governantes tomem medidas para ultrapassar as principais barreiras como fundos de investimento, mercado para os produtos secundários e medidas de conscientização para a população.

Essa revisão contribui com um maior entendimento das principais ferramentas utilizadas na GRSU, critérios que influenciam a tomada de decisão e alternativas de tecnologias. Apesar de ter inúmeros trabalhos propondo modelos de decisão na GRSU, a maioria foca na identificação de um cenário ou alternativa sem se atentar com a forma dessa implementação. Assim sendo, essa revisão também contribui sugerindo a construção de modelos que auxiliem na busca por um cenário integrado de acordo com a região, sendo está uma lacuna do conhecimento entorno da GRSU. Essas informações também contribuem na ordem prática auxiliando a identificar pontos importantes da implementação relacionado com os aspectos regionais e desempenho das tecnologias. Dessa forma, contribuirá com os tomadores de decisão das prefeituras ou empresas concessionadas no planejamento da GRSU buscando cenários que apresentam melhor desempenho. Fica claro também a necessidade da conscientização da população e disseminação do conhecimento sintetizado aqui.

Apesar das contribuições dessa revisão, ainda existe muitas lacunas na literatura em relação aos problemas relacionados aos RSU e as possíveis soluções. Assim, sugestões para trabalhos futuros emergem deste trabalho:

- A construção de um modelo que auxilie na sequência de implementação das tecnologias buscando um cenário integrado.

- Avaliar a viabilidade de se integrar o maior número de tecnologias de GRSU, sendo que pode ser que configurações com um número menor de tecnologias pode ser mais viável.

Uma limitação dessa revisão foi basear a busca apenas nas bases de dados Google Scholar e Scopus e o uso das expressões que buscaram apenas trabalhos que aplicaram alguma ferramenta na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- ALLESCH, A.; BRUNNER, P.H. **Assessment methods for solid waste management: A literature review.** *Waste Management & Research*, London, vol. 32, n.6, p. 461–473, 2014.
- AL-SALEM, S.M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J., **Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review,** *Waste Management*, London, vol. 29, p. 2625–2643, 2009.
- ANTONOPOULOS, I.-S. *et al.* **Ranking municipal solid waste treatment alternatives considering sustainability criteria using the analytical hierarchical process tool,** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 86, p. 149–159, 2014.
- ARENA, U. **Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review.** *Waste Management*, London, vol. 32, n. 4, p. 625–639, 2012.
- ARENA, U., MASTELLONE, M.L.; PERUGINI, F. **The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study.** *Chemical Engineering Journal*, Amsterdam, vol. 96, p. 207–222, 2003.
- ARIKAN, E.; ŞIMSIT-KALENDER, Z.T.; VAYVAY, O. **Solid waste disposal methodology selection using multi-criteria decision making methods and an application in Turkey.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 142, part. 1, p. 403–412, 2017.
- BABALOLA, M.A.A. **Multi-Criteria Decision Analysis of Waste Treatment Options for Food and Biodegradable Waste Management in Japan.** *Environments*, Waterloo, vol. 2, p. 471-488, 2015.
- BANAR, M.; COKAYGIL, Z.; OZKAN, A. **Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey,** *Waste Management*, London, vol. 29, p. 54-62, 2009.
- BIOLCHINI, J.C.A. *et al.* **Scientific research ontology to support systematic review in software engineering.** *Advanced Engineering Informatics*, London, vol. 21, p. 133–151, 2007.
- CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy.** *Waste Management*, London, vol. 28, p. 2552–2564, 2008.
- CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration,** *Energy*, London, vol. 34, p. 2116–2123, 2009.
- COROMINAS, L. *et al.* **Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art.** *Water research*, London, vol. 47, p. 5480-5492, 2013.

DONG, J. *et al.* **Energy–environment–economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study.** *Applied Energy*, London, vol. 114, p. 400–408, 2014.

ERIKSSON, O. *et al.* **Municipal solid waste management from a systems perspective,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 13, p. 241–252, 2005.

FILHO, W.L. *et al.* **Benchmarking approaches and methods in the field of urban waste management,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 112, p. 4377-4386, 2016.

GENG, Y.; TSUYOSHI, F.; CHEN, X. **Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 18, p. 993-1000, 2010.

GUERRERO, L.A.; MAAS, G.; HOGGLAND, W. **Solid waste management challenges for cities in developing countries,** *Waste Management*, London, vol. 33, p. 220–232, 2013.

HANANDEH, A.E.; EL-ZEIN, A. **The development and application of multi-criteria decision-making tool with consideration of uncertainty: The selection of a management strategy for the bio-degradable fraction in the municipal solid waste.** *Bioresource Technology*, London, vol. 101, p. 555–561, 2010.

HAWKINS, T.R. *et al.* **Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles,** *Journal of Industrial Ecology*, New Haven, vol. 17, p. 53-64, 2012.

HERVA, M.; ROCA, E. **Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis.** *Ecological Indicators*, Amsterdam, vol. 25, p. 77-84, 2013.

HUNG, M.L.; MA, H.W.; YANG, W.F. **A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management.** *Waste Management*, London, vol. 27, p. 209–219, 2007.

INGLEZAKIS, V. L. *et al.* **Analysis of Current Situation in Municipal Waste Management and Implementation of Decision Support Software in Astana, Kazakhstan.** *Conferência: Actas do 5º Simpósio Internacional sobre Energia de Biomassa e Resíduos*, Veneza, Itália, 2014.

INGLEZAKIS, V. L. *et al.* **Waste management in Romania: Current data and Application of a Decision Support Tool.** *Environmental Engineering and Management Journal*, Iași, vol.15, n. 3, p. 511-519, 2016.

JOVANOVIC, S. *et al.* **Using multi-criteria decision making for selection of the optimal strategy for municipal solid waste management.** *Waste Management & Research*, London, vol. 34, n.9, p. 884– 895, 2016.

KADAFI, A.A. *et al.* **Applications of System Analysis Techniques in Solid Waste Management Assessment.** *Polish Journal Environmental. Studies*, Olsztyn, vol. 23, n.4, p. 1061-1070, 2014.

KARMPERIS, A.C. *et al.* **Decision support models for solid waste management: Review and game-theoretic approaches.** *Waste Management*, London, vol. 33, p. 1290–1301, 2013.

KAHRAMAN, C.; SARI, I.U. **Multicriteria Environmental Risk Evaluation Using Type II Fuzzy Sets.** *Advances in Computational Intelligence*, vol. 300 of the series Communications in Computer and Information Science, p. 449-457, 2012.

KHAN, S.; FAISAL, M.N. **An analytic network process model for municipal solid waste disposal options,** *Waste Management*, London, vol. 28, p. 1500–1508, 2008.

KHARAT, M.G.R.; SACHIN, R.; KAMBLE, K.S.J. **The application of DELPHI and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection.** *Management of Environmental Quality: An International Journal*, London, vol. 27, n. 4, p. 427-440, 2016.

KOLLIKATHARA, N.; FENG, H.; STERN, E. **A purview of waste management evolution: Special emphasis on USA.** *Waste Management*, London, vol. 29, n. 2, p. 974–985, 2009.

LI, X.G. *et al.* **Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 32, p. 96-100, 2012.

LIMA, J.D. *et al.* **Modelo de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região nordeste do Brasil,** *Revista AIDIS*, São Paulo, vol. 6, n.3, p. 11–28, 2013.

LIMA, J.D. *et al.* **Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil.** *Engenharia Sanitária Ambiental*, Rio de Janeiro, vol. 19, p. 33-42, 2014.

LIU, H.C.; WUC, J.; LI, P. **Assessment of health-care waste disposal methods using a VIKOR-based fuzzy multi-criteria decision making method.** *Waste Management*, London, vol. 33, p. 2744–2751, 2013.

LIU, H.C. *et al.* **Site selection in municipal solid waste management with extended VIKOR method under fuzzy environment.** *Environmental Earth Sciences*, Brandenburg, vol. 72, p. 4179–4189, 2014.

LODEIRO, I.G. *et al.* **Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator.** *Construction and Building Materials*, London, vol. 105, p. 218–226, 2016.

LOLLI, F. *et al.* **Waste treatment: an environmental, economic and social analysis with a new group fuzzy PROMETHEE approach.** *Clean Technologies Environmental Policy*, Berlin, vol. 18, p. 1317–1332, 2016.

LOUIS, G.E.; MAGPILI, L.M.; PINTO, C.A. **Multi-Criteria Decision Making and composting of waste in the municipality of Bacoor in the Philippines.** *International Journal Environmental Technology and Management*, London, vol. 7, n. ¾, p. 351-368, 2007.

MAKAN, A. *et al.* **Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for the treatment of municipal solid waste in Morocco.** *International. Journal Environment and Waste Management*, London, vol. 12, n. 3, p.1-15, 2013.

MAKAN A.; MOUNTADAR M. **Sustainable management of municipal solid waste in Morocco: Application of PROMETHEE method for choosing the optimal management scheme.** *African Journal Environmental Waste Management*, Nova York, vol. 1, p. 001-013, 2013.

MANAF, L.A.; BASRI, H.; BASRI, N.E.A. **UrusSisa: An Intelligent System for Integrated Solid Waste Management.** *Journal of Sustainable Development*, United States, vol. 1, n. 2. p. 39-46, 2008.

MANCINI, S.D.; FERRAZ, J.L.; BIZZO, W.L. Resíduos Sólidos. In: ROSA, A.H.; FRACETO, L.F.; CARLOS, V.M. **Meio Ambiente e Sustentabilidade.** Brasil, Porto Alegre: Bookman, vol. 15, p. 346-374, 2012.

MARSHALL, R.E.; FARAHAHAKHSH, K. **Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries.** *Waste Management*, London, vol. 33, p. 988–1003, 2013.

MAVROTAS, G. *et al.* **Municipal solid waste management and energy production: Consideration of external cost through multi-objective optimization and its effect on waste-to-energy solutions,** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, vol. 51, p. 1205-1222, 2015.

MCKAY, G. **Caracterização, formação e minimização de dioxinas durante a incineração de resíduos sólidos urbanos (MSW): revisão,** *Jornal de Engenharia Química*, São Paulo, vol. 86, n. 3, p. 343-368, 2002.

MENDES, M.R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. **Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA.** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 41, p. 47–63, 2004.

MIR, M.A. *et al.* **Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model.** *Journal of Environmental Management*, United States, vol. 166, p. 109–115, 2016.

NIEMEIJER, D.; GROOT, R.S. **A conceptual framework for selecting environmental indicator sets.** *Ecological Indicators*, Amsterdam, vol. 8, p. 14 – 25, 2008.

NIXON, J.D. *et al.* **Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process,** *Energy*, London, vol. 59, p. 215–223, 2013.

NOURI, J. *et al.* **Comparison of solid waste management scenarios based on life cycle analysis and multi-criteria decision making: Case study Isfahan city.** *Iranian Journal of Science & Technology*, Xiraz, vol. 38, n. 3, p. 257-264, 2014.

ÖZELER O.D.; YETIS, U.; DEMIRER G.N. **Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study.** *Environment International*, London, vol. 32, p. 405 – 411, 2006.

PANAGIOTIDOU, N.; STAVRAKAKIS, G.S.; DIAKAKI, C. **Sustainable urban solid waste management planning with the use of an advanced interactive decision support system based on the PROMETHEE II method.** *International Journal. Decision Support Systems*, Hershey, vol. 1, n. 3, p. 294-324, 2015.

PANDYASWARGO, A.H.; ONODA, H.; NAGATA, K. **Energy recovery potential and life cycle impact assessment of municipal solid waste management technologies in Asian countries using ELP model,** *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Berlin, vol. 3, n. 28, p. 1-28, 2012.

PERKOULIDIS, G. *et al.* **Integrated assessment of a new Waste-to-Energy facility in Central Greece in the context of regional perspectives,** *Waste Management*, London, vol. 30, p. 1395–1406, 2010.

PIRES, A.; CHANGB, N.B.; MARTINHOA, G. **An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setubal Peninsula, Portugal,** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 56, p. 7-21, 2011.

SAMAH, M.A.A. *et al.* **Solid Waste Management: Analytical Hierarchy Process (AHP) Pppliation of Selecting Treatment Technology in Sepang Municipal Council, Malaysia.** *Current World Environment*, Madhya Pradesh, vol. 6, p. 1-16, 2011.

SOLTANI, A. *et al.* **Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review.** *Waste Management*, London, vol. 35, p. 318-328, 2015.

SOLTANI, A.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. **Selecting sustainable waste-to-energy technologies for municipal solid waste treatment: a game theory approach for group decision-making.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 113, p. 388–399, 2016.

- SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. **Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 57, p. 92-100, 2013.
- SOUZA, R.G. *et al.* **Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil.** *Waste Management*, London, vol. 57, p. 46–56, 2016.
- SU, J.P. *et al.* **Applying multi-criteria decision-making to improve the waste reduction policy in Taiwan.** *Waste Management & Research*, London, vol. 28, p.20-28, 2009.
- TAN, S.T. *et al.* **Optimal process network for municipal solid waste management in Iskandar Malaysia.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 71, p. 48-58, 2014.
- THAMPI, A.; RAO, B. **Application of multi-criteria decision making tools for technology choice in treatment and disposal of municipal solid waste for local self government bodies: A case study of Kerala, India.** *Journal of Solid Waste Technology and Management*, Pensilvânia, vol. 41, p. 84-95, 2015.
- TARMUDI, Z.; ABDULLAH, M.L.; TAP, A.O.M. **Evaluating Municipal Solid Waste Disposal Options by AHP-based Linguistic Variable Weight,** *MATEMATIKA*, Skudai, vol. 26, p. 1–14, 2010.
- THE WORLD BANK. **What a waste: a global review of solid waste management.** 2012. Retrieved from <<http://go.worldbank.org/BCQEP0TMO0>>.
- TURCONI, R.; ASTRUP, A.B.T. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, London, vol. 28, p. 555–565, 2013.
- TSENG, M.L. **Application of ANP and DEMATEL to evaluate the decision-making of municipal solid waste management in Metro Manila.** *Environmental Monitoring and Assessment*, Amsterdam, vol. 156, p. 181–197, 2009.
- ULUKAN, H. Z.; KOP, Y. **Multi-criteria decision making (MCDM) of solid waste collection methods using Life Cycle Assessment (LCA) outputs.** *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Troyes, p. 584-589, 2009.
- VEGO, G.; KUCAR-DRAGICEVIC, S.; KOPRIVANAC, N. **Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia.** *Waste Management*, London, vol. 28, n. 11, p. 2192–2201, 2008.
- VUCIJAK, B.; KURTAGIC, S.M.; SILAJDZIC, I. **Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 130, p. 166-174, 2016.

YAP, H.Y.; NIXON, J.D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. *Waste Management*, London, vol. 46, p. 265–277, 2015.

YAY, A.S.E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 94, p. 284-293, 2015.

ZAMAN, A.U. Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. *International Journal Environmental Science Technology*, Teerão, vol. 7, n.2, p. 225-234, 2010.

3 ARTIGO 2 – A TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE MUNICÍPIOS PEQUENOS BRASILEIROS

3.1 RESUMO

Os problemas atuais e futuros relacionados a má gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem incentivado a busca pela gestão integrada destes resíduos por meio da implementação de políticas públicas por todo o mundo. No Brasil, apesar dos municípios grandes estarem se adequando mais rapidamente a política nacional de resíduos sólidos, é nos municípios pequenos que está concentrado a maioria da população e, conseqüentemente, a maior parte dos RSU. Assim, este trabalho criou um modelo de auxílio a decisão aos municípios menores de 100 mil habitantes na busca pela gestão integrada por meio da aplicação da ferramenta de tomada de decisão multicriterial TOPSIS baseados em dados adaptados de avaliação do ciclo de vida (LCA). Foi observado que a implementação de alternativas baseadas no tratamento biológico é preferível em relação a implementação de tratamentos térmicos. Apesar desses resultados, o incremento de critérios nesse modelo, assim como a aplicação do LCA no próprio local ou em plantas de porte semelhante traria resultados mais confiáveis.

Palavras chaves: Gestão de resíduos sólidos, RSU, TOPSIS, tomada de decisão

3.2 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem aumentado em todos os continentes e tende a continuar crescendo, sendo a maior fonte de resíduos do mundo (LEME *et al.*, 2014; ACHILLAS *et al.*, 2011). Essa situação é atribuída ao crescimento populacional e às mudanças de hábitos e padrões de consumo, influência socioeconômica, (SUTHAR; SAJWAN, 2014). A geração de RSU varia de acordo com a cultura regional, tamanho das cidades, renda per capita por influenciar a rotina das pessoas e assim os padrões de consumo. No Brasil, estima-se que cerca de 78,3 milhões de toneladas sejam geradas com uma cobertura de coleta de 91% e destinados para disposição final (58,4% aterro sanitário; 41,6% aterro controlado ou lixões). A destinação inadequada dos resíduos continua em 3331 municípios (ABRELPE, 2016). Outro

dado importante, porém de 2012, é que os municípios pequenos (menores que 100 mil habitantes) são os que produzem maiores quantidades de resíduos, seguido pelos municípios médios (de 100 mil a 1 milhão de habitantes) quase na mesma quantidade que os municípios grandes (maiores que 1 milhão de habitantes) (IPEA, 2012). Assim vale uma atenção a gestão dos resíduos sólidos urbanos de municípios pequenos.

A destinação final desses resíduos mais usada é a disposição final em aterros (ABRELPE, 2016; IPEA, 2012; SUTHAR; SAJWAN, 2014). Essa prática promove apenas uma pequena redução dos resíduos exigindo assim um grande volume de área necessária, tornando-se insustentável. Além disso, o aterro necessitará de monitoramento por toda sua existência para evitar problemas ambientais e acidentais que podem ocorrer pelo vazamento das emissões dos lixiviados líquidos e gasosos, tornando-se então, economicamente inviável. Assim, o uso de aterros tende a ser abolido. Existe uma tendência pela gestão integrada dos RSU que consiste na combinação de processos e tecnologias que promovem a recuperação, o reaproveitamento, o tratamento e a reciclagem dos resíduos produzindo matérias primas, adubos e energia renovável. Assim a gestão integrada promove melhor desempenho ambiental, econômico e social (MIR *et al*, 2016; LOLLI *et al*, 2016).

As políticas de resíduos sólidos urbanos da União Europeia estão sendo implementadas como a Diretiva de 2008/98/CE que classifica hierarquicamente práticas de gestão dos resíduos (i) prevenção, (ii) usar de novo, (iii) reciclar, (iv) valorização e (v) eliminação. Essas políticas tem o objetivo de promover a diminuição na geração de RSU assim como seu reaproveitamento e a reciclagem por meio de práticas como a coleta seletiva e a triagem além de incentivar a valorização dos resíduos antes de uma destinação final por meio de tecnologias como a compostagem, a digestão anaeróbica, incineração, gaseificação, etc. Essa política busca a Emissão Zero baseado nos ciclos naturais, onde todo os resíduos são reaproveitados em algum processo se tornando matérias primas, sendo consumidas pelo menos na mesma velocidade de sua produção. Muitos países, principalmente desenvolvidos, tem evoluídos bastante na GRSU nesses aspectos. A Suíça é um exemplo de GRSU bem sucedida por não utilizar mais os aterros como destinação final dos RSU (MANCINI *et al*. 2012).

Em 2010 foi implementada Lei 12.305/2010 sendo parte do planejamento do governo federal de reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE). Essa Lei determina princípios, objetivos, instrumentos, promove a responsabilidade compartilhada, fornece um guia para resíduos perigosos e instrumentos econômicos a ser aplicados, além de encorajar a implementação da gestão integrada. Porém essa política não estabelece objetivos e prazos nem

para os resíduos sólidos nem para a recuperação de gases e energia produzidas no aterro (LOUREIRO *et al.*, 2013). Nos municípios pequenos são onde se encontra a maior parte da população brasileira e são os que estão com maior dificuldade de adequação na política.

As dificuldades em relação a gestão dos resíduos sólidos urbanos (GRSU) é em decorrência da complexidade multicriterial do problema. Além da GRSU envolver questões ambientais, econômicas e sociais, ela envolve vários *stakeholders* como as empresas, organizações, prefeituras e a população (ANTONOPOULOS, 2014; SOLTANI, 2015). Entre as principais barreiras observadas na gestão dos resíduos sólidos urbanos estão a falta de conhecimento em relação aos problemas gerados e possíveis alternativas de tratamento, infraestrutura, da falta de recursos financeiros, de organização e liderança institucional, dados confiáveis, entre outros (GUERRERO *et al.*, 2013).

Os municípios grandes estão se adequando mais rapidamente, apesar de uma saída normalmente utilizada ser a transferência do RSU para outros municípios menores (IPEA, 2012). Já os pequenos e médios municípios que é onde se encontra a maior parte dos resíduos produzidos no Brasil, estão com dificuldade em adequação recorrendo a terceirização desse serviço. Assim, este trabalho procurou aplicar o método de tomada de decisão multicriterial (MCDM) para ranquear qual a melhor sequência de implementação de alternativas de GRSU para municípios de pequeno porte brasileiros buscando um cenário ideal.

Os métodos de apoio a decisão multicriterial (MCDM) organiza o pensamento intuitivo na forma de matriz hierarquizada com o objetivo da decisão no topo, seguido pelos critérios envolvidos e por último as alternativas existentes. Os resultados é uma priorização da importância dos critérios e as preferências das alternativas. Existe uma certa variedade de MCDM como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SOLTANI *et al.*, 2016), *Analytic Network Process* (ANP) (NIXON *et al.* 2013), ELECTRE (PERKOULIDIS *et al.* 2010), PROMETHEE (LOLLI *et al.* 2016), TOPSIS (MIR *et al.* 2016), entre outros. Esses métodos possui uma grande aceitação no meio científico com uma aplicação bem variada como na Logística, Negócios e Marketing, Saúde e Meio Ambiente, Sistemas de Produção, Recursos Humanos, Gestão de Energia, Hídrica, de Resíduos, Engenharia Química, Medicina, Agricultura, entre outros (BEHZADIAN, 2012).

Com as dificuldades dos municípios brasileiros em se adequarem a política nacional dos RSU, o uso de ferramentas de MCDM na GRSU fica-se justificado devido à complexidade multicriterial do problema. Este trabalho procurou criar um modelo de apoio a decisão focando

na ordem de implementação de alternativas de tratamento dos RSU buscando uma gestão integrada. Assim este trabalho busca responder as seguintes perguntas:

- Qual a melhor sequência de implementação de alternativas de tratamento dos RSU para municípios de pequeno porte?
- Qual cenário ou alternativas terá melhor desempenho em relação aos critérios ambientais, econômicos, sociais e técnicos?

Assim, com a limitação de recursos municipais para a implementação de uma gestão integrada completa, um ordenamento da implementação das tecnologias que compõe essa gestão integrada tem um papel fundamental para a alcança-la. Dessa forma, o objetivo geral desse artigo é produzir um modelo de apoio a decisão específico para situação de Alfenas-MG buscando identificar o caminho crítico de implementação de alternativas de tratamento baseados em ganhos ambientais, econômicos e sociais. Os objetivos específicos é o estudo das alternativas de tratamento dos RSU, assim como da ferramenta TOPSIS e LCA na GRSU, compreendendo seus pontos positivos e negativos.

Esse artigos está organizado com a introdução seguida por uma revisão da literatura que aborda a GRSU e a MCDM, seguidos pela metodologia utilizada para alcançar os resultados, a apresentação dos resultados junto com uma discussão, e por fim, a apresentação das conclusões e as referências bibliográficas utilizadas.

3.3 REVISÃO DA LITERATURA

3.3.1 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O crescimento na geração de RSU tem chamado a atenção de governos, empresas, entidades e população. Segundo o Banco Mundial (2012), a geração de resíduos sólidos dobrou na primeira década desse século e deve triplicar na segunda década (THE WORLD BANK, 2012; SOLTANI *et al.*, 2016). A alternativa de destinação final mais usada é o disposição final em aterros sanitários (ABRELPE, 2016; IPEA, 2012; SUTHAR; SAJWAN, 2014). Porém, essa alternativa não promove a redução dos resíduos se tornando insustentável pelo o volume que

lhe é destinado (INGLEZAKIS *et al.*, 2014). Além disso, apesar dessa alternativa ser a que envolve menores investimento inicial, existe a necessidade de monitoramento e manutenção por toda sua vida. Assim, existe uma tendência de substituir essa alternativa para cenários que combine tecnologias que promovam o reaproveitamento de materiais e a reciclagem da fração orgânica dos RSU e da fração inorgânica promovendo a produção de produtos secundários como energia e adubos. Essa forma de gerir os RSU é chamada de gestão integrada e é baseada nos ciclos naturais buscando a emissão zero (CHERUBINI *et al.*, 2008). Essa gestão integrada é o objetivo de várias políticas governamentais mundiais como a Diretiva de 2008/98/CE da União Europeia e a Política Nacional dos RSU de 2010 do Brasil (COMISSÃO EUROPEIA, 2008; BRASIL, 2010). Apesar dessa GRSU promover uma série de benefícios, existe uma certa dificuldade em implementá-la. Alguns países desenvolvidos tem evoluído nessa perspectiva, evitando formas de disposição final. Por exemplo, a Suíça já aboliu essa prática e a Dinamarca e a Bélgica destinam apenas 5% e 10% dos seus resíduos a disposição final, respectivamente (MANCINI *et al.*, 2012).

Os problemas relacionados a GRSU são mais intensos em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento do que em países desenvolvidos. Existe uma certa dificuldade em mensurar e caracterizar os RSU devido à falta de equipamentos e organização por parte das partes envolvidas e muitas vezes, parte desses RSU não chegam a serem coletados para uma destinação final (INGLEZAKIS *et al.*, 2014; YAY, 2015; SU *et al.*, 2010). Os principais problemas gerados pelos aterros são a poluição dos corpos de água afetando a saúde humana e do ecossistema, queda no valor de propriedades e do turismo local, ruídos, odores, vibrações, queimadas, explosões, proliferação de pragas e doenças (THAMPI; RAO, 2015; DONG *et al.*, 2014; HUNG *et al.*, 2007; LOUIS *et al.*, 2007). As principais barreiras enfrentadas na GRSU é a falta de conhecimento dos problemas e seus alcances, das alternativas de tratamento, falta de infraestrutura, organização e liderança institucional, dados confiáveis, investimentos financeiros, entre outros (GUERRERO *et al.*, 2013). Devido a essa série de barreiras encontradas, uma saída mais simples pelos os governantes é recorrer a terceirização desse serviço e conseqüentemente do problema.

Apesar de no Brasil mais de 90% dos resíduos serem destinados a formas de disposição final (ABRELPE, 2016), existe uma tendência global pela combinação de tecnologias que promova a redução e reciclagem de todos os tipos de resíduos. Segundo Jovanovic *et al.* (2016), quanto mais alternativas forem empregadas na GRSU, maior será o volume reduzido para deposição em aterros, entretanto, maior será o investimento (JOVANOVIC *et al.*, 2016). Essas

tecnologias se combinam para recuperar resíduos destinando-os a reciclagem ou a processos com potencial de geração de energia. Entretanto, os RSU podem ser divididos em dois grandes grupos que podem passar por processos diferentes de tratamento, a fração orgânica e a fração inorgânica dos resíduos sólidos urbanos.

Existem tecnologias que possuem a capacidade de reciclar apenas a fração orgânica como a digestão anaeróbica e a compostagem. A digestão anaeróbica tem a capacidade de reduzir até 70% da matéria orgânica que lhe é destinada. Na digestão anaeróbica, a fração orgânica é submetida a fermentação anaeróbica produzindo gás metano que pode ser usado como combustível para transporte, para climatização ou outras necessidade de calor e para geração de energia elétrica (YAP; NIXON, 2015). A eficiência desse processo pode ser aumentada com a adição de lodo de esgoto (NIXON *et al.*, 2013). Os resíduos deste processo caso não ocorra a fermentação completa, ou até mesmo toda a fração orgânica podem serem submetidos a compostagem direta produzindo um composto que pode ser utilizado como adubo. Esses tratamentos biológicos contribuem na produção de energia de fontes renováveis, além de produzir um produto que devolve nutrientes e matéria orgânica para o solo que tem sido tão explorado (REICHERT *et al.*, 2016).

Já as tecnologias térmicas promovem a queima dos resíduos para a geração de energia elétrica chegando a reduzir até 90% dos resíduos que lhe são destinados (YAP; NIXON, 2015). Assim, resíduos com maior poder calorífico apresentam uma melhor eficiência de geração de energia, que é o caso da fração inorgânica dos RSU (17 MJ/Kg) (CHERUBINI *et al.*, 2008). Já a fração orgânica por apresentar menor poder calorífico (8,85 MJ/Kg) terá um menor rendimento podendo haver a necessidade do uso de combustíveis (YAP; NIXON, 2015). Entretanto, caso a fração orgânica não passe por um tratamento biológico, é melhor queima-la do que enterra-la. Dessa forma, os tratamento térmicos possuem maior flexibilidade em receber tipos diferentes de resíduos do que os tratamentos biológicos. Um problema da incineração são as emissões de poluentes atmosféricos (CO₂, SO₂, NO_x, etc) que podem serem evitados por sistemas de controle e limpezas do gases (CHERUBINI *et al.*, 2008).

Assim, diferentes tecnologias possuem desempenho de redução deferentes para cada tipo de resíduos. A gestão integrada procura destinar cada tipo de resíduos para a alternativa de tratamento adequada formando um cenário de GRSU. Com isso, espera-se que a gestão integrada apresente melhores desempenhos ambientais, econômicos de operação, sociais e técnicos. Ou seja, se aproximando da estratégia de emissões zero dos ciclos naturais sendo

assim, mais sustentável. Entretanto, os custos de implementação de uma gestão integrada é maior por ter que implementar mais tecnologias. Um outro ponto é a comercialização dos produtos secundários (basicamente adubo e energia) que não possuem um mercado estabelecido na maioria dos locais (YAP; NIXON, 2015; PANAGIOTIDOU *et al.*, 2015).

Dessa forma, a separação do material reciclável, juntamente com a fração orgânica sendo destinada aos tratamento biológicos e a fração inorgânica sendo destinada a incineração ou outro tratamento térmico, uma separação dos RSU passa a ser um processo que afetará positivamente o desempenho dos processos subsequentes, se tornando assim fundamental.

3.3.2 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITERIAL

Existe uma certa variedade de métodos que apoiam a tomada de decisão, na quais, se destacam a análise de custo benefício (CBA), programação multiobjectivo (MPO), avaliação do ciclo de vida (LCA) e suas variações como avaliação ciclo de custeio (LCC) e o método de tomada de decisão multicriterial (MCDM) (SU *et al.*, 2010; HUNG *et al.*, 2007). Entre essas, o MCDM se destaca por permitir uma análise envolvendo múltiplos critérios, muitas vezes conflitantes, além de permitir a combinação de visões de diferentes *stakeholders*. O LCA também se destaca por avaliar todo o ciclo de vida de um projeto, avaliando as entradas e as saídas.

O MCDM é um ramo da pesquisa operacional útil para avaliar situações complexas que envolve múltiplos critérios e *stakeholders*. De um modo geral, essas ferramentas avaliam um problema definindo os principais critérios e alternativas possíveis envolvidas para se alcançar o objetivo da decisão. Como resultados, elas produzem uma hierarquia dos critérios e alternativas com maior importância para um atingir o objetivo. Assim, esse método reduz as incertezas da tomada de decisões complexas avaliando o desempenho das possíveis alternativas de acordo com os critérios envolvidos, muitas vezes conflitantes (ULUKAN; KOP, 2009).

As variações de ferramentas do MCDM possuem pontos positivos e negativos, fazendo que elas sejam adequadas em diferentes situações. Por exemplo, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é a ferramenta mais usada pela sua facilidade de coleta de dados por entrevistas simples. Sua aplicação é aconselhada quando existe a necessidade de capturar opiniões subjetivas de

problemas pouco explorados permitindo a coleta de informações de diferentes *stakeholders*. Porém, ferramentas como o TOPSIS e PROMETHEE que podem utilizar dados menos subjetivos, são mais aconselhadas para problemas um pouco mais explorado, partindo de dados coletados *in situ*. O PROMETHEE possui uma matemática que avalia a interação entre todos critérios envolvidos (ARIKAN *et al*, 2017), diferente do TOPSIS que avalia qual alternativa está mais próxima da solução ideal e mais longe da solução não ideal (BEHZADIAN, 2012). Entretanto, a combinação de diferentes ferramentas em uma análise é bem vista, permitindo a combinação dos pontos positivos de cada ferramenta. Muitas vezes, o AHP é utilizado para definir os pesos dos critérios utilizados outras ferramentas com abordagens menos subjetivas (EKMEKÇIOGLU *et al.*, 2010).

Essas ferramentas que possuem abordagens menos subjetivas buscam utilizar dados coletados *in situ*. Assim, o LCA é uma ferramenta que se destaca por permitir essa coleta de dados *in situ* avaliando todo o ciclo de vida, avaliando as entradas e saídas dos processos. Essa ferramenta é muito utilizada na análise de questões ambientais por avaliar o consumo de recursos e as emissões dos processos (DONG *et al.*, 2014). Nesse mesmo raciocínio, ela também pode ser utilizada para avaliar a saúde financeira de um empreendimento, avaliando os custos dos processos e os recursos recuperados, avaliando o LCC (LOLLI *et al.*, 2016). Assim o LCA é uma ótima ferramenta para se coletar dados não subjetivos para serem utilizados nas ferramentas MCDM.

3.4 METODOLOGIA

Este trabalho aplicou a ferramenta TOPSIS para ranquear a implementação de alternativas de GRSU de acordo com diferentes situações e prioridades que serão levantadas na discussão dos resultados. Foi utilizado o TOPSIS por sua capacidade de avaliar critérios conflitantes definindo a alternativa que mais se aproxima da solução ideal e se distancia da solução não ideal entre as alternativas estudadas. Os dados selecionados forma baseados na avaliação do ciclo de vida (LCA) feito por Reichert (2013) na cidade de Porto Alegre – RS, Brasil.

3.4.1 TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTION (TOPISIS)

O TOPISIS é um método simples de classificação desenvolvido por Hwang e Yoon (1981). Através de valores, ele prioriza as alternativas que tem menor distância da solução ideal positiva e maior distância da solução ideal negativa. A solução ideal positiva maximiza (SIP) os benefícios dos critérios e minimiza os critérios que trazem prejuízos. Já a solução ideal negativa (SIN) maximiza os critérios que dão prejuízo e minimiza os critérios benéficos. O TOPISIS faz pleno uso de informações de atributos sem ter a necessidade de preferências desses atributos, fornece ranque cardinal das alternativas (BEHZADIAN, 2012).

A metodologia TOPISIS é aplicada em 5 passos. Primeiramente é construída uma matriz de decisão inicial, e esta é normalizada mediante a aplicação da equação 1:

$$r_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J w_{ij}^2}}, j = 1, 2, \dots, J; i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

No 2º passo, uma matriz normalizada e ponderada é obtida a partir da multiplicação da matriz normalizada com os pesos dos critérios, conforme a equação 2:

$$V_{ij} = W_i^* r_{ij}, j = 1, 2, \dots, J; i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

No 3º passo, é determinado as SIP e SIN conforme a equação 3 e 4, respectivamente:

$$A^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*\} \quad (3)$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \quad (4)$$

No 4º passo, é calculado as medidas de separação para cada alternativa de SIP e SIN usando a equação 5 e 6, respectivamente:

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^*)^2}, j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}, j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

E por último é feito o cálculo de coeficiente de proximidade relativa, conforme a equação 7:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-} \quad (7)$$

A classificação das prioridades segue a ordem decrescente do coeficiente de proximidade.

O TOPISIS tem sido aplicado com sucesso em uma ampla gama de área, principalmente as que exigem ênfase em problemas de decisão interdisciplinar e sócias (BEHZADIAN, 2012), como é o caso desse trabalho.

O TOPSIS é uma ferramenta matemática que permite uma certa flexibilidade na seleção e coleta dos dados, permitindo dados tanto qualitativos como quantitativos. Os dados qualitativos são coletados por meio de entrevistas (ARIKAN *et al.*, 2017; MIR *et al.*, 2016). Já os dados quantitativos são normalmente coletados de estudos de LCA (DONG *et al.*, 2014; NOURI *et al.*, 2014; ULUKAN; KOP, 2009; SU *et al.*, 2010; MIR *et al.*, 2016), apesar da possibilidade do uso de dados de banco de dados ou relatórios técnicos. Apesar dessas possibilidades, o uso de informações encontradas em diferentes bancos de dados e/ou relatórios técnicos e/ou artigos de LCA precisam ser usados com cautela devido a diferentes portes, objetos de estudo, além de diferentes métodos e ferramentas de coleta de dados, que pode resultar na seleção de dados incoerentes. Apesar de existir relatórios nacionais em relação aos RSU como do Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABELPRE, 2016), Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) e Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico (SNIS, 2013), não foram encontrados dados oriundos de um mesmo local e método de coleta de diferentes alternativas que pudessem ser aplicado coerentemente. Assim, nesse trabalho, foi utilizado os dados levantados por (REICHERT, G.A, 2013) aplicando LCA na cidade de Porto Alegre - RS, Brasil.

3.4.2 APLICAÇÃO DO MODELO

Primeiramente foram selecionados os critérios de acordo com a frequência em artigos científicos, por estarem presentes no estudo de Reichert (2013) e pela subjetividade.

Os critérios ambientais foram selecionados de acordo com indicadores ambientais como “toxicidade”, “acidificação”, “eutrofização”, “fototoxicidade” e “potencial de aquecimento

global” visto em artigos de GRSU (SOLTANI *et al.*, 2016; YAY, 2015; ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2011; ZAMAN, 2010; BANAR *et al.*, 2009). Os critérios econômicos mais usados nos trabalhos envolvendo a GRSU variam pouco. Os mais vistos e utilizados nesse trabalho foram “custo inicial”, “custo de operação”, “receita” (YAP; NIXON, 2015; PANAGIOTIDOU, 2015; INGLEZAKIS *et al.*, 2014; MAKAN; MOUNTADAR, 2013; PIRES *et al.*, 2011; SAMAH *et al.*, 2011; TARMUDI *et al.*, 2010; MAKAN *et al.*, 2003). Existe uma certa dificuldade em mensurar os critérios sociais, sendo estes os menos estabelecidos e frequentes em trabalhos. Foram selecionados “geração de empregos”, “odor”, “impacto visual”, “demanda de espaço” (PANAGIOTIDOU, 2015; ANTONOPOULOS *et al.*, 2014; INGLEZAKIS *et al.*, 2014; PIRES *et al.*, 2011; MAKAN *et al.*, 2003). Os critérios técnicos utilizados foram “taxa de recuperação de resíduos”, “balanço energético”, “redução da fração orgânica” e “redução da fração inorgânica” (KHARAT *et al.*, 2016; INGLEZAKIS *et al.*, 2016; JOVANOVIC *et al.*, 2016; INGLEZAKIS *et al.*, 2014; HANANDEH; EL-ZEIN, 2010; HERVA; ROCA, 2013; SONG *et al.*, 2013). A “redução de resíduos” foram divididos em “redução da fração orgânica” e “redução da fração inorgânica” para que se possa captar a influência da caracterização dos RSU local na priorização de implementação das alternativas. Assim, a Figura 2.1 mostra como ficou a matriz de comparação.

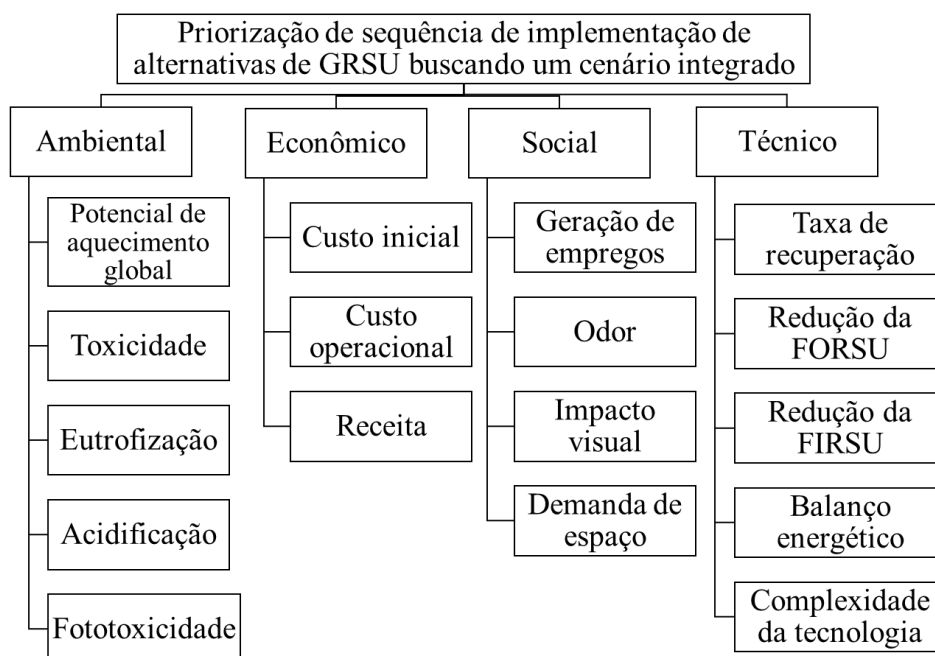


Figura 2.1: Matriz de decisão para GRSU

Para adequação dos dados oriundos de Porto Alegre – RS às condições de Alfenas – MG, foram feitas conversões. Primeiramente, vale ressaltar, que o método TOPSIS trabalha

com valores normalizados para identificar a distância da alternativa entre as soluções ideais positivas e negativas. Assim, o valor absoluto pode ser substituído por valores que represente essa distância entre as soluções ideias positivas e negativas. Portanto foram selecionados, em sua maioria, os dados dos critérios já normalizados. Os critérios econômicos foram baseados nas fórmulas de cálculos de custos e receitas utilizadas no mesmo estudo. Os valores dos critérios técnicos “redução de orgânicos” e “redução de inorgânicos” foram baseados na capacidade de redução das alternativas (YAP; NIXON, 2015; CHERUBINI *et al.*, 2008). A partir dos dados normalizados, foram feitas adaptações nos valores dos critérios ambientais. Como os critérios ambientais depende das entradas e saídas das alternativas de tratamento, foi feito uma adaptação dos valores de acordo com a caracterização dos RSU da cidade de Alfenas, que possui 67% de resíduos orgânicos e 33% de resíduos inorgânicos (ALFENAS, 2011), que é bem acima da média nacional (SNIS, 2013).

Esses dados (Anexo 1) foram aplicados em quatro cenários com diferentes enfoques de tratamento. No primeiro cenário os RSU são destinados diretamente ao aterro sanitário sem qualquer pré tratamento. O segundo cenário é destinado ao tratamento da fração orgânica (67%) com a aplicação da digestão anaeróbica e da compostagem, sendo os resíduos destes processos juntamente com a fração inorgânica (33%) destinado ao aterro sanitário. O terceiro cenário foi baseado na aplicação da incineração na queima de 80% dos RSU e o restante, assim como as cinzas da incineração, destinada ao aterro sanitário. O quarto cenário, cenário integrado, foi baseado na combinação da digestão anaeróbica, compostagem e incineração. Nesse cenário, a fração orgânica é destinada digestão anaeróbica e compostagem. Os resíduos destes processos são encaminhados a incineração junto com a fração inorgânica. Os resíduos da incineração são cinzas que são destinadas ao aterro sanitário. A coleta seletiva assim como a reciclagem de materiais são práticas que trazem benefícios a todos os processo na GRSU (SU *et al.*, 2010), assim, ela foi considerada em todos os cenário deste estudo, podendo então ser excluído dos cálculos.

Os cálculos do TOSPSI foram feitas no Excel para análise dos resultados. O quadro contendo os valores utilizados encontra-se no Anexo 1.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos da aplicação do TOPSIS voltado para cidades de pequeno porte brasileira de acordo com a caracterização dos RSU do município de Alfenas-MG pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Priorização das alternativas de GRSU

Alternativa	Proximidade relativa da solução ideal	Priorização
Integrado	0,8708	1°
Trat. Biológico	0,7150	2°
Incineração	0,6142	3°
Aterro	0,0315	4°

Os resultados demonstram que a gestão integrada deve ser apoiada, da mesma forma que a descontinuação do uso de aterros, assim como esperado. A descontinuação dos aterros sanitários é uma prática que vem sendo incentivada por todo o mundo, apesar das dificuldades de fazê-la. Isso acontece devido à necessidade e dificuldade de monitoramento por toda a vida do aterro para evitar problemas ambientais como a poluição dos corpos de água e solo pela lixiviação do chorume, além das emissões atmosféricas. Além disso, o crescente volume de resíduos produzidos que lhe é destinado, torna esta prática insustentável, devido a pequena capacidade de redução dos resíduos que o aterro possui (VUCIJKAKA *et al.*, 2016). Assim, a gestão integrada passa a ser incentivada por possui a maior capacidade de redução de volume dos resíduos, destinando cada fração de resíduos a alternativa de tratamento ideal, ou seja, que apresenta maior volume de redução dos resíduos além da valorização deste na produção de produtos secundários.

O tratamento biológico apresentou a segunda melhor proximidade relativa da solução ideal (PRSI). Nós podemos atribuir esse resultado a caracterização dos RSU, que desempenha uma influência fundamental na seleção da alternativa, sendo que a predominância da fração orgânica tende a selecionar cenários que busquem a redução desta fração orgânica, que é o caso deste trabalho. Apesar disso, o tratamento térmico da incineração apresentou um desempenho de PRSI aceitável. Porém, existe a necessidade de avaliar a necessidade de gastos de combustíveis para conseguir incinerar o grande volume de matéria orgânica úmida, que possui baixo poder calorífico. Além dos gastos com os combustíveis, é preciso avaliar as emissões de poluentes extras associadas.

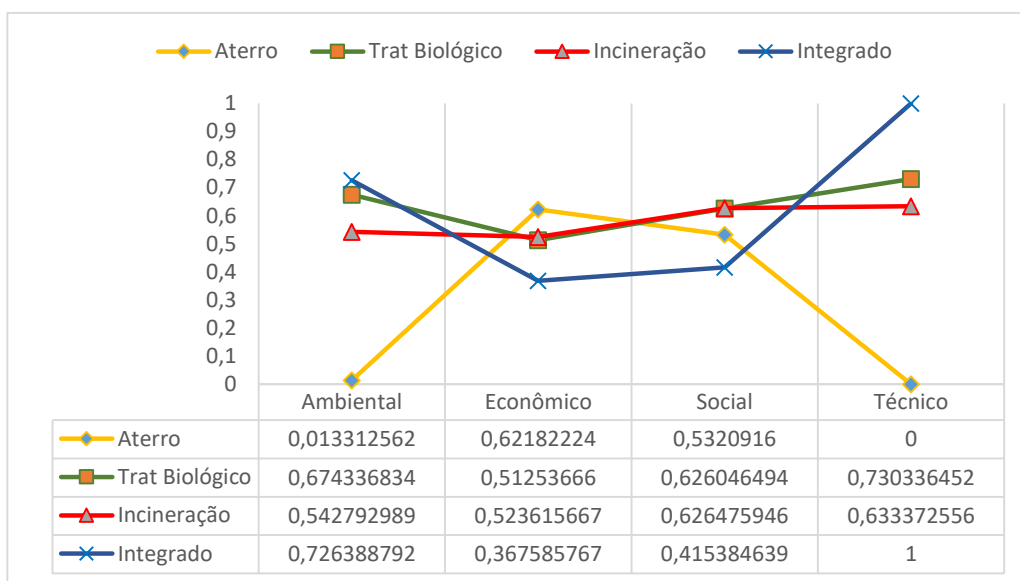
Assim, como os países desenvolvidos possui uma maior predominância da fração inorgânica (VUCIJAKA *et al.*, 2016), neles existe uma preferência por cenários com capacidade de redução da fração inorgânica como os tratamento térmicos. Se considerarmos uma evolução nos padrões de vida e consumo dos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento se aproximando dos padrões dos países desenvolvidos, as alternativas de tratamento de resíduos orgânicos tendem a se tornar secundárias, principalmente com a evolução dos tratamentos térmicos na queima de resíduos com pouco poder calorífico, que é o caso dos orgânicos. Entretanto, ela ainda é viável, e mesmo reduzindo a porcentagem de sua produção, com o aumento da população, as plantas de tratamento orgânico ainda continuarão sendo úteis.

Assim, para a cidade de Alfenas-MG, o tratamento biológico é aconselhado para se iniciar a buscar pelo o cenário integrado, devido aos maiores volumes de redução dos RSU diminuindo a carga dos aterros, assim como a capacidade em gerar produtos secundários como o adubo e a energia (considerada como renovável), e assim, produzir receita a partir destes produtos e conseqüentemente possuir melhor desempenho econômico de operação, gerando empregos e apresentando um baixo impacto ambiental.

A Figura 2.2 representa o desempenho positivo de cada alternativa em relação aos critérios individualmente estudados. Podemos perceber que a Gestão Integrada apresenta o melhor desempenho nos critérios ambientais e técnicos. A explicação para esses resultados é devido ao direcionamento das frações orgânicas e inorgânicas dos resíduos para alternativas que apresentam melhor desempenho de tratamento, conduzem a uma maior redução do volume dos resíduos e assim, diminuindo as emissões causando menor impacto ambiental e recuperando mais energia. Pelos mesmos motivos o tratamento biológico apresentou a segunda colocação nestes critério específicos. Podemos perceber que o aterro não representa benefícios de acordo com esses critérios.

Quando analisamos separadamente a hierarquia das alternativas em relação ao critério econômico, o aterro passa apresentar o melhor desempenho, seguido pela incineração, tratamento biológico e por último a gestão integrada. Esse resultado é considerando a recuperação de gases do aterro. Caso a recuperação deste gás do aterro não seja considerado, ele passa a ser a 3º prioridade, ficando na frente apenas da gestão integrada, que apresenta maior custo de investimento. Outro ponto importante é que esse modelo não analisa a viabilidade econômica a longo prazo, considerando os custos operacionais e de receitas por um ano. Desta

forma, o peso do investimento inicial passa a ser superestimado. Para fazer uma análise temporal da viabilidade econômica, é preciso criar modelos de previsão do custo de operação e da cotação dos produtos secundários, além dos custos de monitoramento e manutenção de cada alternativa, na qual, o aterro apresentaria os maiores custos por exigir atenção por toda sua vida. Dessa forma, a priorização das alternativas em relação aos critérios econômicos fica com a incineração em primeiro lugar seguido do tratamento biológico. Entretanto, vale ressaltar que não foram considerados os custos de possíveis combustíveis necessários para conseguir alcançar o poder calorífico dos resíduos com predominância da matéria orgânica.



Legenda: Os valores representam a proximidade relativa da solução ideal que é 1.

Figura 2.2: Representação dos benefícios das alternativa em relação aos critérios

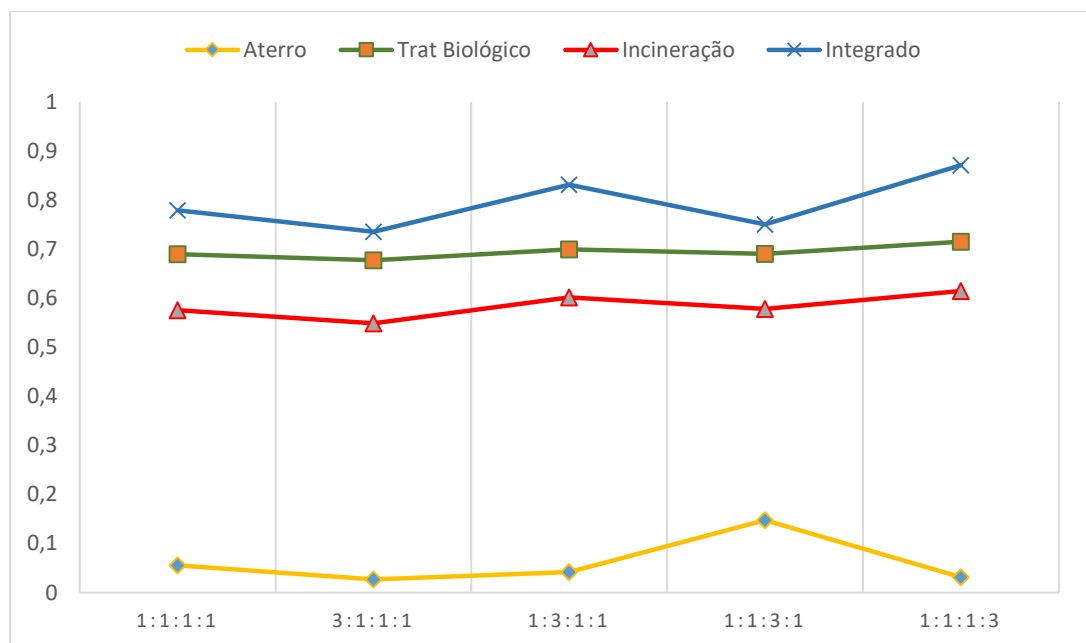
Quando avaliamos os critérios sociais separadamente, a incineração e o tratamento biológico encabeçam a priorização praticamente empatados, seguidos pelo aterro e por último a gestão integrada. A gestão integrada apresentou esse mau desempenho devido ao maior espaço urbano necessário e impacto visual para implementar todas as alternativas, sendo que nos outros subcritérios sociais não houve muita discrepância dos dados.

3.5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como os municípios estão com dificuldades na implementação de uma única alternativa, quem dirá da implementação de uma gestão integrada rápida. Assim, esse trabalho busca identificar qual a 1ª alternativa a ser implementada buscando a gestão integrada. Essa

análise pode ser aplicada para diferentes situações e prioridades como a necessidade de reduzir os impactos ambientais (3:1:1:1 na Figura 2.3), ou do enfoque na saúde financeira do município (1:3:1:1 na Figura 2.3), ou com base em ganhos sociais (1:1:3:1 na Figura 2.3), ou com enfoque na maior desempenho de redução dos RSU e recuperação de energia (1:1:1:3 na Figura 2.3), etc. Para isso é importante analisarmos o desempenho de cada cenário em relação a variação de pesos dos critérios ambientais, econômicos, sociais e técnicos, conforme a Figura 2.3.

A Figura 2.3 demonstra que a primeira alternativa de tratamento dos RSU em Alfenas-MG, assim como cidades de pequeno porte com predominância da fração orgânica é o tratamento biológico. Esse resultado pode ser extrapolado para a maioria das cidades brasileiras de pequeno porte por apresentar caracterização de resíduos com predominância da fração orgânica. Mesmo variando os pesos dos critérios o tratamento biológico continuou sendo a alternativa preferencial, demonstrando a robustez dos resultados. Além disso, confirmamos o baixo desempenho do aterro sanitário, mesmo com a recuperação de gases, incentivando a sua descontinuação e a busca por alternativas que reduzem a carga deste.



Legenda: Pesos para os critérios ambientais: econômicos: sociais: técnico
 Figura 2.3: Análise de sensibilidade (ambientais: econômicos: sociais: técnicos).

3.6 CONCLUSÕES

Este trabalho aplicou o método de tomada de decisão multicriterial TOPSIS para priorizar qual estratégia para GRSU é mais sustentável hoje para pequenas cidades brasileiras (menor que 100 mil habitantes), que é onde está concentrada a maior parte da população e produção de RSU brasileiros (IPEA, 2012). Esse trabalho contribui em relação as discussões em relação a busca pela gestão integrada dos RSU com base na sustentabilidade, assim como a aplicação de MCDM na GRSU. Além disso, esse trabalho fornece um guia prático para os tomadores de decisão que enfrentam esse problema.

Foi observado que o TOPSIS é um modelo útil para avaliar problemas complexos que envolve múltiplos critérios como o caso da GRSU. O modelo indicou que a gestão integrada deve ser priorizada em municípios pequenos brasileiros. Assim, com as dificuldades de implementar a gestão integrada, este trabalho guiou a discussão com o intuito de identificar qual o melhor caminho para se chegar a gestão integrada. Assim, os resultados demonstraram que deve-se implementar primeiramente o tratamento biológico para depois implementar o tratamento térmico. Esses resultados é atribuído a caracterização dos RSU de Alfenas com predominância da fração orgânica (67%), atribuindo vantagens ambientais, de volume de redução dos RSU, a produção de produtos secundários, e assim, maior sustentabilidade.

Esse trabalho fornece um guia prático para os município de pequeno porte guiarem suas ações buscando a gestão integrada e trazendo os ganhos associados. Assim, o municípios pequenos tem a oportunidade de guiar suas ações, evitando terceirizações, com a possibilidade de obter ganhos financeiros, contribuir com a saúde da população e do ecossistema, gerando emprego, etc. É importante ressaltar que uma política paralela de conscientização da população e dos *stakeholders* envolvidos é essencial para uma mudança de GRSU desse porte.

Os critérios envolvidos nessa GRSU variam de acordo com os objetivos dos estudos. Porém os critérios mais vistos são classificados em ambientais, econômicos, sociais, técnicos, políticos e administrativo. Dessa forma, os principais subcritérios envolvidos são as “emissões atmosféricas”, “redução de resíduos”, “saúde humana”, “consumo de recursos”, “emissões”, “custo inicial”, “custo operacional”, “receita com produtos secundários”, “aceitação social”, “geração de emprego”, “demanda de terra”, “recuperação de produtos”, “RH qualificado”, “harmonização com o quadro legislativo” e “apoio político”. Esses subcritérios podem ser

classificados de diferentes formas de acordo com a interpretação e objetivos do tomador de decisão.

Apesar dos achados deste trabalho, ele carrega algumas limitações. Primeiramente, pela falta de dados, esse modelo baseou em dados de outro município para adequação com as condições locais. O ideal seria um estudo de avaliação de ciclo de vida do aterro do próprio município, assim como plantas de incineração, digestão anaeróbica e compostagem de portes adequados a realidade do município. Outra limitação foi o número de critérios utilizados, sendo que modelos com maior número de critérios revelaria uma análise de cenário mais completo e assim, mais confiável.

Para trabalhos futuros, seria interessante a aplicação de estudo de avaliação de ciclo de vida em alternativas de GRSU da região ou de portes semelhantes. A aplicação de outras ferramentas de MCDM também tem seu valor na confirmação destes resultados. Além disso, um estudo similar a esse, variando a caracterização dos RSU seria proveitoso para avaliar o caminho crítico da busca pela gestão integrada em diferentes situações, contribuindo com um maior número de municípios. Por fim, a produção de um modelo específico para cidades de médio porte, que é onde também se encontra uma concentração de população e resíduos considerável, teria seu valor.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2016**. São Paulo, SP, 2016.

ACHILLAS C.H. *et al.* **Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area**. *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 55, n. 9–10, p. 857–863, 2011.

ALFENAS-MG. **Relatório técnico da gestão de resíduos**. Alfenas Ambientar, Alfenas, MG, (2011).

ANTONOPOULOS, I.-S. *et al.* **Ranking municipal solid waste treatment alternatives considering sustainability criteria using the analytical hierarchical process tool**, *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 86, p. 149–159, 2014.

ARIKAN, E.; ŞIMSIT-KALENDER, Z.T.; VAYVAY, O. Solid waste disposal methodology selection using multi-criteria decision making methods and an application in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 142, part 1, p. 403–412, 2017.

BANAR, M.; COKAYGIL, Z.; OZKAN, A. **Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey**, *Waste Management*, London, vol. 29, p. 54–62, 2009.

BEHZADIAN, M. *et al.* **A state-of the-art survey of TOPSIS applications**. *Expert Systems with Applications*, London, vol. 39, n. 17, p. 13051–13069, 2012.

BRASIL. Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, agosto de 2010.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life cycle assessment of urban waste management: Energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy**. *Waste Management*, London, vol. 28, p. 2552–2564, 2008.

DONG, J. *et al.* **Energy–environment–economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study**. *Applied Energy*, London, vol. 114, p. 400–408, 2014.

GUERRERO, L.A.; MAAS, G.; HOGGLAND, W. **Solid waste management challenges for cities in developing countries**, *Waste Management*, London, vol. 33, p. 220–232, 2013.

HANANDEH, A.E.; EL-ZEIN, A. **The development and application of multi-criteria decision-making tool with consideration of uncertainty: The selection of a management strategy for the bio-degradable fraction in the municipal solid waste**. *Bioresource Technology*, London, vol. 101, p. 555–561, 2010.

HERVA, M.; ROCA, E. **Ranking municipal solid waste treatment alternatives based on ecological footprint and multi-criteria analysis.** *Ecological Indicators*, Amsterdam, vol. 25, p. 77-84, 2013.

HUNG, M.L.; MA, H.W.; YANG, W.F. **A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management.** *Waste Management*, London, vol. 27, p. 209-219, 2007.

HWANG, C.L.; YOON, K. **Methods for Multiple Attribute Decision Making,** *Multiple Attribute Decision Making*, Berlin, vol. 186, p. 58-191, 1981.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos:** relatório técnico. Brasília, 2012.

INGLEZAKIS, V. L. *et al.* **Analysis of Current Situation in Municipal Waste Management and Implementation of Decision Support Software in Astana, Kazakhstan.** *Conferência: Actas do 5º Simpósio Internacional sobre Energia de Biomassa e Resíduos*, VENEZA, 2014.

INGLEZAKIS, V. L. *et al.* **Waste management in Romania: Current data and Application of a Decision Support Tool.** *Environmental Engineering and Management Journal*, Iași, vol.15, n. 3, p. 511-519, 2016.

JOVANOVIC, S. *et al.* **Using multi-criteria decision making for selection of the optimal strategy for municipal solid waste management.** *Waste Management & Research*, London, vol. 34, n. 9, p. 884-895, 2016.

KHARAT, M.G.R.; SACHIN, R.; KAMBLE, K.S.J. **The application of DELPHI and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection.** *Management of Environmental Quality: An International Journal*, London, vol. 27, n. 4, p. 427-440, 2016.

LEME M.M.V. *et al.* **Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil.** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 87, p. 8-20, 2014.

LOLLI, F. *et al.* **Waste treatment: an environmental, economic and social analysis with a new group fuzzy PROMETHEE approach.** *Clean Technologies Environmental Policy*, Berlin, vol. 18, p. 1317-1332, 2016.

LOUIS, G.E.; MAGPILI, L.M.; PINTO, C.A. **Multi-Criteria Decision Making and composting of waste in the municipality of Bacoor in the Philippines.** *Int. J. Environmental Technology and Management*, London, vol. 7, n. ¾, p. 351-368, 2007.

LOUREIRO S.M.; ROVERE E.L.L.; MAHLER C.F. **Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil in the state and city of Rio de Janeiro.** *Waste Management*, London, vol. 33, n. 5, p. 1302-1312, 2013.

MAKAN A.; MOUNTADAR M. **Sustainable management of municipal solid waste in Morocco: Application of PROMETHEE method for choosing the optimal management**

scheme. *African Journal Environmental Waste Management*, Nova York, vol. 1, p. 001-013, 2013.

MANCINI, S.D.; FERRAZ, J.L.; BIZZO, W.L. Resíduos Sólidos. In: ROSA, A.H.; FRACETO, L.F.; CARLOS, V.M. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Brasil, Porto Alegre: Bookman, 2012. cap. 15, p. 346-374.

MIR, M.A. *et al.* **Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model.** *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, vol. 166, p. 109–115, 2016.

NIXON, J.D. *et al.* **Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process,** *Energy*, London, vol. 59, p. 215–223, 2013.

NOURI, J. *et al.* **Comparison of solid waste management scenarios based on life cycle analysis and multi-criteria decision-making: Case study Isfahan city.** *Iranian Journal of Science & Technology*, Xiraz, vol. 38, n. 3, p. 257-264, 2014.

PANAGIOTIDOU, N.; STAVRAKAKIS, G.S.; DIAKAKI, C. **Sustainable urban solid waste management planning with the use of an advanced interactive decision support system based on the PROMETHEE II method.** *Int. J. Decision Support Systems*, Amsterdam, vol. 1, n. 3, p. 294-324, 2015.

PERKOULIDIS, G. *et al.* **Integrated assessment of a new Waste-to-Energy facility in Central Greece in the context of regional perspectives,** *Waste Management*, London, vol. 30, p. 1395–1406, 2010.

PIRES, A.; CHANGB, N.B.; MARTINHOA, G. **An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setubal Peninsula, Portugal,** *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 56, p. 7-21, 2011.

REICHERT, J.M., AMADO, T.J.C., REINERT, D.J., RODRIGUES, M.R., SUZUKI, L.E.A.S. **Land use effects on subtropical, sandy soil under sandyization/desertification processes,** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Amsterdam, vol. 233, n. 3, p. 370-380, 2016.

REICHERT, G.A. **Apoio a tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre** – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SAMAH, M.A.A. *et al.* **Solid Waste Management: Analytical Hierarchy Process (AHP) Ppplication of Selecting Treatment Technology in Sepang Municipal Council, Malaysia.** *Current World Environment*, Madhya Pradesh, vol. 6, p. 1-16, 2011.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. SNIS **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos** (2013).SNSA, SNIS, Ministério das Cidades, Brasília (2013) <http://www.snis.gov.br> (acessado em 20/10/2015).

SOLTANI, A. *et al.* **Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review.** *Waste Management*, London, vol. 35, p. 318-328, 2015.

SOLTANI, A.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. **Selecting sustainable waste-to-energy technologies for municipal solid waste treatment: a game theory approach for group decision-making.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 113, p. 388–399, 2016.

SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. **Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 57, p. 92-100, 2013.

SU, J.P. *et al.* **Applying multi-criteria decision-making to improve the waste reduction policy in Taiwan.** *Waste Management & Research*, London, vol. 28, p. 20-28, 2009.

SUTHAR, S.; SAJWAN, A. **Rapid impact assessment matrix (RIAM) analysis as decision tool to select new site for municipal solid waste disposal: A case study of Dehradun city, India.** *Sustainable Cities and Society*, Amsterdam, vol. 13, p. 12-19, 2014.

TARMUDI, Z.; ABDULLAH, M.L.; TAP, A.O.M. **Evaluating Municipal Solid Waste Disposal Options by AHP-based Linguistic Variable Weight,** *MATEMATIKA*, Skudai, vol. 26, p. 1–14, 2010.

THAMPI, A.; RAO, B. **Application of multi-criteria decision making tools for technology choice in treatment and disposal of municipal solid waste for local self government bodies: A case study of Kerala, India.** *Journal of Solid Waste Technology and Management*, Pensilvânia, vol. 41, p. 84-95, 2015.

THE WORLD BANK. **What a waste: a global review of solid waste management.** 2012. Retrieved from <<http://go.worldbank.org/BCQEP0TMO0>>.

ULUKAN, H. Z.; KOP, Y. **Multi-criteria decision making (MCDM) of solid waste collection methods using Life Cycle Assessment (LCA) outputs.** *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Troyes, p. 584-589, 2009.

VUCIJAK, B.; KURTAGIC, S.M.; SILAJDZIC, I. **Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina,** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 130, p. 166-174, 2016.

YAP, H.Y.; NIXON, J.D. **A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK.** *Waste Management*, London, vol. 46, p. 265–277, 2015.

YAY, A.S.E. **Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya.** *Journal of Cleaner Production*, London, vol. 94, p. 284-293, 2015.

ZAMAN, A.U. **Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method.** *International Journal Environmental Science Technology*, Teerão, vol. 7, n.2, p. 225-234, 2010.

4 CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação avaliou as principais ferramentas de auxílio a tomada de decisão aplicadas na GRSU, assim como os principais aspectos entorno desta gestão. Foi observado que a avaliação do ciclo de vida (LCA) é a ferramenta mais usada na GRSU, apesar de ser útil apenas em relação a critérios quantitativos. Métodos de tomada de decisão multicriterial também tiveram uma boa aplicação na GRSU, se destacando o AHP, PROMETHEE e TOPSIS, cada um com suas peculiaridades. A combinação de ferramentas também foi visto como benéfica, por combinaram as vantagens de cada método.

Em relação a GRSU, foi observado que apesar de existir alternativas viáveis para uma GRSU mais sustentável, falta a aplicação prática. Muitas vezes a falta de aplicação prática é atribuída a falta de recursos financeiros, entretanto, muitos trabalhos já demonstraram que a aplicação de alternativas possuem vantagens financeiros por reciclar os resíduos produzindo energia e adubos, sem contar dos custos do monitoramento e manutenção de aterros por toda sua existência. Assim, essa falta de aplicação pode estar envolvida com a falta de conhecimento por parte dos tomadores de decisão, falta de conscientização dos problemas envolvidos na GRSU ou falta de interesse em resolver essas questões. A aplicação de alternativas de tratamento dos RSU tem potencial de obter ganhos ambientais, econômicos e sociais, ou seja, tornar a GRSU mais sustentável.

Esses resultados demonstram a necessidade de mais atenções entorno dos problemas relacionados a GRSU, assim como das possíveis alternativas, da conscientização da população e partes governamentais. A gestão integrada de alternativas no tratamento dos RSU é uma tendência que substituirá as formas de disposição final dos resíduos como os aterros, trazendo benefícios ambientais, o desenvolvimento de mercado e empregos, bem estar social e desenvolvimento tecnológico, aproximando-se da estratégia da Emissão zero, baseada nos ciclos naturais.

Essa dissertação contribui com o enriquecimento da literatura em relação aos problemas, as alternativas, a aspectos da gestão entorno dos RSU. Além disso, ela produz um modelo de aplicação que visa a sequência de implementação de alternativas buscando a gestão integrada, inédito na literatura. Outro ponto inédito é a criação de um modelo com o enfoque para cidade pequenas (menos de 100 mil habitantes). Assim, além das contribuições teóricas, essa dissertação também contribui na ordem prática para os tomadores de decisão relacionados a

GRSU, principalmente de municípios pequenos com predominância da fração orgânica. Os resultados demonstraram que é preferível implementar tratamentos biológicos (compostagem e digestão anaeróbica) primeiramente, buscando a gestão integrada. A predominância da fração orgânica é um fator decisivo na priorização destas tecnologias, pois possuem maior capacidade de redução destes resíduos com um balanço energético mais favorável e assim, menos impactos ambientais e sociais. Esses resultados foram baseados em cenários que apresentam a triagem e a reciclagem em seus processos, pois já foi visto na literatura que estes processos apresentam desempenho positivo em todos os processos subsequentes.

Apesar das contribuições desta dissertação, ela carrega algumas limitações. A revisão sistemática foi baseada em apenas ferramentas de MCDM e LCA, que são as mais utilizadas na GRSU, mas não as únicas. Outra limitação foi que a pesquisa se concentrou nas bases de dados de Google Scholar e Scopus.

Para trabalhos futuros, seria de grande importância a aplicação de LCA em cidade de pequeno e médio porte brasileiros para um diagnóstico mais confiável da situação da GRSU nesses locais, que apresentam a maior fração de RSU produzidos no Brasil. Posteriormente, a aplicação do modelo (com flexibilidade) produzido no segundo artigo dessa dissertação a partir dos dados gerados do LCA teria maior robustez.

APÊNDICE

Tabela A1: Frequência dos subcritérios ambientais mais vistos

Subcritérios	Nº de artigos	%	Autores
Saúde humana	22	46%	Hung <i>et al.</i> (2007); Khan <i>et al.</i> (2008); Banar <i>et al.</i> (2009); Tseng (2009); Ulukan; Kop (2009); Hanandeh; El-Zein (2010); Samah <i>et al.</i> (2011); Liua <i>et al.</i> (2013); Song <i>et al.</i> (2013); Nouri <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Thampi; Rao (2015); Yap; Nixon (2015); Kharat <i>et al.</i> (2016); Lolli <i>et al.</i> (2016); Soltani <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman, (2010); Yay, (2015).
Consumo de recursos	19	40%	Hung <i>et al.</i> (2007); Vegoa <i>et al.</i> (2008); Tseng, (2009); Nouri <i>et al.</i> (2014); Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Banar <i>et al.</i> (2009); Ulukan and Kop, (2009); Zaman, (2010); Songa <i>et al.</i> (2013); Arena <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Yay, (2015); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Herva; Roca (2013); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016).
Aquecimento Global	17	35%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Ekmekçiöğlü <i>et al.</i> (2010); Tan <i>et al.</i> (2014); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Yay (2015); Su <i>et al.</i> (2010); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Redução de RSU	17	35%	Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Arikana <i>et al.</i> (2015); Yap; Nixon (2015); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Nouri <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Nixon <i>et al.</i> (2013); Liu <i>et al.</i> (2013); Herva; Roca (2013); Xia <i>et al.</i> (2010); Hanandeh; El-Zein (2010); Geng <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Makan <i>et al.</i> (2003)
Emissões Atm.	16	33%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016); Herva; Roca (2013); Hanandeh; El-Zein (2010); Lolli <i>et al.</i> (2016); Geng <i>et al.</i> (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).
Poluição dos recursos hídricos	16	33%	Yap; Nixon (2015); Ekmekçiöğlü <i>et al.</i> (2010); Herva; Roca (2013); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Lolli <i>et al.</i> (2016); Zaman (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Samah <i>et al.</i> (2011); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Yay (2015); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Dong <i>et al.</i> (2014); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Recuperação dos resíduos	15	31%	Arikan <i>et al.</i> (2017); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon, (2015); Nouri <i>et al.</i> (2014); Ekmekçiöğlü <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Hanandeh and El-Zein, (2010); Özeler <i>et al.</i> (2006); Makan and Mountadar, (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Kharat <i>et al.</i> (2016); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).
Impacto ecológico	14	29%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng (2009); Yap; Nixon (2015); Nouri <i>et al.</i> (2014); Herva; Roca (2013); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Lolli <i>et al.</i> (2016); Ulukan; Kop (2009); Zaman (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Arena <i>et al.</i> (2003); Makan; Mountadar (2013); Yay (2015); Thampi; Rao (2015)
Acidificação	13	27%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Lolli <i>et al.</i> (2016); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Arena <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Yay (2015).
Ambiental	13	27%	Louis <i>et al.</i> (2007); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Manaf <i>et al.</i> (2008); Tseng (2009); Bovea <i>et al.</i> (2010); Su <i>et al.</i> (2010); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Xia <i>et al.</i> (2010); Dong <i>et al.</i> (2014); Arikana <i>et al.</i> (2015); Mir <i>et al.</i> (2016); Soltani <i>et al.</i> (2016); Yay (2015).
Demanda por terra	12	25%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng, (2009); Yap; Nixon, (2015); Pires <i>et al.</i> (2011); Lolli <i>et al.</i> (2016); Makan and Mountadar, (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Thampi and Rao, (2015); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).

Poluição	11	23%	Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Arena <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).
Eutrofização	10	21%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Banar <i>et al.</i> (2009); Lolli <i>et al.</i> (2016); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Yay (2015)
Energia bruta utilizada	9	19%	Pires <i>et al.</i> (2011); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Lolli <i>et al.</i> (2016); Songa <i>et al.</i> (2013); Arena <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)

Tabela A2: Frequência dos subcritérios ambientais menos vistos

Subcritérios	Nº de artigos	%	Autores
Controle da poluição do ar	7	15%	Arıkan <i>et al.</i> (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Dong <i>et al.</i> (2014)
Oxidação fotoquímica	6	13%	Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Banar <i>et al.</i> (2009); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Yay (2015)
Destruição da camada de ozônio	5	10%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Lolli <i>et al.</i> (2016); Zaman (2010); Yay (2015)
Poluição do solo	5	10%	Lolli <i>et al.</i> (2016); Makan; Mountadar (2013); Yay (2015); Thampi; Rao (2015); Makan <i>et al.</i> (2003)
Poluição sonora	5	10%	Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).
Poluição Visual	5	10%	Makan; Mountadar (2013); Makan <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Localização	4	8%	Vegoa <i>et al.</i> (2008); Samah <i>et al.</i> (2011); Khan <i>et al.</i> (2008); Thampi and Rao, (2015)
Odor	3	6%	Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Thampi; Rao (2015)
Viabilidade energética	3	6%	Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Dong <i>et al.</i> (2014)
Separação dos resíduos	2	4%	Yap; Nixon (2015); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010)
Alteração de habitat	1	2%	Soltani <i>et al.</i> (2016)
Esgotamento de combustíveis fósseis	1	2%	Soltani <i>et al.</i> (2016)
Radiação	1	2%	Lolli <i>et al.</i> (2016)

Tabela A3: Frequência de subcritérios econômicos

Subcritérios	Nº de artigos	%	Autores
Custo inicial	24	50%	Hung <i>et al.</i> (2007); Vegoa <i>et al.</i> (2008); Arikana <i>et al.</i> (2015); Tseng (2009); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016); Nouri <i>et al.</i> (2014); Liu <i>et al.</i> (2013); Pires <i>et al.</i> (2011); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Geng <i>et al.</i> (2010); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Su <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Dong <i>et al.</i> (2014); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014).
Custo operacional	20	42%	Vegoa <i>et al.</i> (2008); Arikana <i>et al.</i> (2015); Tseng (2009); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon (2015); Pires <i>et al.</i> (2011); Tana <i>et al.</i> (2014); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Geng <i>et al.</i> (2010); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Su <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Dong <i>et al.</i> (2014); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Custo de manutenção	9	15%	Yap e Nixon, (2015); Makan e Mountadar, (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014); Thampi and Rao, (2015); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015).
Receita	8	17%	Yap; Nixon (2015); Pires <i>et al.</i> (2011); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Custo total	7	15%	Tana <i>et al.</i> (2014); Xia <i>et al.</i> (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Geng <i>et al.</i> (2010); Samah <i>et al.</i> (2011); Su <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010)
Viabilidade financeira/ Econômico	7	15%	Hung <i>et al.</i> (2007); Dong <i>et al.</i> (2014); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Lolli <i>et al.</i> (2016); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Louis <i>et al.</i> (2007)
Lucro líquido	3	6%	Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Dong <i>et al.</i> (2014)
Custo do terreno	2	4%	Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Transporte	2	4%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Geng <i>et al.</i> (2010)
Controle do orçamento	1	2%	Khan <i>et al.</i> (2008)
Custo pré tratamento	1	2%	Yap; Nixon (2015)
Desenvolvimento do mercado	1	2%	Thampi; Rao (2015)
Fundos de apoio	1	2%	Tseng (2009)
Eficiência Econômica p/ a população	1	2%	Pires <i>et al.</i> (2011)
Taxa paga pela população	1	2%	Pires <i>et al.</i> (2011)

Tabela A4: Frequência de subcritérios sociais

Subcritérios	Nº de Artigos	%	Autores
Aceitação social	15	32%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng (2009); Liua <i>et al.</i> (2013); Xia <i>et al.</i> (2010); Lolli <i>et al.</i> (2016); Samah <i>et al.</i> (2011); Arena <i>et al.</i> (2003); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Su <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Kharat <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Geração de empregos	13	27%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Lolli <i>et al.</i> (2016); Arena <i>et al.</i> (2003); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Lima et al, (2013); Lima et al, (2014).
Bem estar social	5	10%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng (2009); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016).
Justiça Social	5	10%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng (2009); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Su <i>et al.</i> (2010); Thampi; Rao (2015)
Condições de trabalho	4	8%	Lolli <i>et al.</i> (2016); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Envolvimento da comunidade	3	6%	Manaf <i>et al.</i> (2008); Khan <i>et al.</i> (2008); Thampi; Rao (2015)
Social/cultural	3	6%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Louis <i>et al.</i> (2007)
PIB	2	4%	Lima et al, (2013); Lima et al, (2014).
IDH	2	4%	Lima et al, (2013); Lima et al, (2014).
Educação	1	2%	Su <i>et al.</i> (2010)

Tabela A5: Frequência de subcritérios técnicos

Subcritérios técnicos	Nº de trabalhos	%	Autores
RH qualificados	12	25%	Yap; Nixon (2015); Manaf <i>et al.</i> (2008); Samah <i>et al.</i> (2011); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Khan <i>et al.</i> (2008); Thampi; Rao (2015); Louis <i>et al.</i> (2007); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Maturidade Tecnológica	10	21%	Hung <i>et al.</i> (2007); Tseng (2009); Yap; Nixon (2015); Liu <i>et al.</i> (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Kharat <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Su <i>et al.</i> (2010).
Flexibilidade	5	10%	Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Viabilidade Geral	5	10%	Vegoa <i>et al.</i> (2008); Arikana <i>et al.</i> (2015); Tana <i>et al.</i> (2014); Samah <i>et al.</i> (2011); Khan <i>et al.</i> (2008)
Viabilidade/Eficiência Técnica	4	8%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Yap; Nixon (2015); Liu <i>et al.</i> (2013); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010)
Prazos de implementação	2	4%	Tseng (2009); Vučijaka <i>et al.</i> (2014)
Pré tratamento	2	4%	Nixona <i>et al.</i> (2013); Thampi; Rao (2015)
Prevalência do uso	2	4%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Thampi; Rao (2015)
Processo contínuo	2	4%	Geng <i>et al.</i> (2010)
Abrangência dos tipos de resíduos	1	2%	Arikana <i>et al.</i> (2015)
Disponibilidade tecnológica	1	2%	Arikana <i>et al.</i> (2015).
Independência de outras Tecnologias	1	2%	Tseng (2009)
Manutenção	1	2%	Vučijaka <i>et al.</i> (2014)
Operação/funcionalidade	1	2%	Makan; Mountadar (2013)
Prazos de Progressos	1	2%	Tseng (2009)
Requisitos de infraestrutura	1	2%	Arikana <i>et al.</i> (2015)
Técnico	1	2%	Contrerasa <i>et al.</i> (2008)

Tabela A6: Subcritérios políticos administrativo

Subcritérios	Nº de artigos	%	Autores
Harmonização com o quadro legislativo	11	23%	Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Khan <i>et al.</i> (2008); Louis <i>et al.</i> (2007); Thampi; Rao (2015); Hanandeh; El-Zein (2010); Yap; Nixon (2015)
Apoio Político	4	8%	Manaf <i>et al.</i> (2008); Khan <i>et al.</i> (2008); Lima <i>et al.</i> , (2013); Lima <i>et al.</i> , (2014)

Tabela A7: Subcritérios administrativo

Subcritérios	Nº de artigos	%	Autores
Adoção da solução consorciada	2	4%	Lima <i>et al.</i> , (2013); Lima <i>et al.</i> , (2014)
Demanda de gestão	1	2%	Su <i>et al.</i> (2010)
Procedimento administrativos	1	2%	Su <i>et al.</i> (2010)

Tabela A8: Frequência das alternativas em cenários ideais

Alternativas	N°	%	Autores
Recuperação de produto	43	86,0%	Hung <i>et al.</i> (2007); Arikana <i>et al.</i> (2015); Tseng (2009); Mira <i>et al.</i> (2016); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016); Dong <i>et al.</i> (2014); Nouri <i>et al.</i> (2014); Liua <i>et al.</i> (2013); Pires <i>et al.</i> (2011); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Herva; Roca (2013); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Bovea <i>et al.</i> (2010); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Xia <i>et al.</i> (2010); Ulukan; Kop (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Geng <i>et al.</i> (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Samah <i>et al.</i> (2011); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Yay (2015); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Jovanovic <i>et al.</i> (2016)
Integração	30	60,0%	Mira <i>et al.</i> (2016); Soltani <i>et al.</i> (2016); Nouri <i>et al.</i> (2014); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Bovea <i>et al.</i> (2010); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Xia <i>et al.</i> (2010); Lolli <i>et al.</i> (2016); Ulukan; Kop (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Geng <i>et al.</i> (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Samah <i>et al.</i> (2011); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016); Yay (2015); Su <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Incineração WtE	29	58,0%	Hung <i>et al.</i> (2007); Arikana <i>et al.</i> (2015); Tseng (2009); Soltani <i>et al.</i> (2016); Dong <i>et al.</i> (2014); Nouri <i>et al.</i> (2014); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Herva; Roca (2013); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Banar <i>et al.</i> (2009); Xia <i>et al.</i> (2010); Özeler <i>et al.</i> (2006); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Geng <i>et al.</i> (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Samah <i>et al.</i> (2011); Yay (2015); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Jovanovic <i>et al.</i> (2016)
Reciclagem	26	52,0%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Tseng (2009); Mira <i>et al.</i> (2016); Nouri <i>et al.</i> (2014); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Bovea <i>et al.</i> (2010); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Ulukan; Kop (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Geng <i>et al.</i> (2010); Samah <i>et al.</i> (2011); Arena <i>et al.</i> (2003); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Yay (2015); Su <i>et al.</i> (2010); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Kharat <i>et al.</i> (2016); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014)
Compostagem	22	44,0%	Mira <i>et al.</i> (2016); Nouri <i>et al.</i> (2014); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Banar <i>et al.</i> (2009); Ulukan; Kop (2009); Song <i>et al.</i> (2013); Samah <i>et al.</i> (2011); Makan; Mountadar (2013); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Yay (2015); Khan <i>et al.</i> (2008); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Louis <i>et al.</i> (2007); Makan <i>et al.</i> (2003); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Aterro Sanitário c WtE	21	42,0%	Soltani <i>et al.</i> (2016); Dong <i>et al.</i> (2014); Tana <i>et al.</i> (2014); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Bovea <i>et al.</i> (2010); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Xia <i>et al.</i> (2010); Ulukan; Kop (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Geng <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Khan <i>et al.</i> (2008); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014)
Digestão Anaeróbica WtE	18	36,0%	Hung <i>et al.</i> (2007); Nixon <i>et al.</i> (2013); Soltani <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Herva; Roca (2013); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Bovea <i>et al.</i> (2010); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Geng <i>et al.</i> (2010); Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Thampi; Rao (2015)
Aterro Sanitário	11	22,0%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Mira <i>et al.</i> (2016); Pires <i>et al.</i> (2011); Arena <i>et al.</i> (2003); Makan; Mountadar (2013); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Yay (2015); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Louis <i>et al.</i> (2007); Makan <i>et al.</i> (2003)
Digestão Anaeróbica	8	16,0%	Mira <i>et al.</i> (2016); Yap; Nixon (2015); Nouri <i>et al.</i> (2014); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015)
Gaseificação	8	16,0%	Tseng (2009); Nixon <i>et al.</i> (2013); Yap; Nixon (2015); Soltani <i>et al.</i> (2016); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Zaman (2010)
Incineração	3	6,0%	Makan; Mountadar (2013); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010); Makan <i>et al.</i> (2003)

Tabela A9: Frequência do uso de ferramentas na GRSU

Ferramenta	N°	%	Autores
AHP	21	42,00%	Hung <i>et al.</i> (2007); Nixon <i>et al.</i> (2013); Soltani <i>et al.</i> (2016); Dong <i>et al.</i> (2014); Pires <i>et al.</i> (2011); Tarmudi <i>et al.</i> (2010); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010); Tana <i>et al.</i> (2014); Manaf <i>et al.</i> (2008); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Herva; Roca (2013); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Samah <i>et al.</i> (2011); Vučijaka <i>et al.</i> (2014); Su <i>et al.</i> (2010); Kharat <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014); Yap; Nixon (2015)
Ciclo de Vida	20	40,00%	Dong <i>et al.</i> (2014); Nouri <i>et al.</i> (2014); Contrerasa <i>et al.</i> (2008); Antonopoulos <i>et al.</i> (2014); Bovea <i>et al.</i> (2010); Pandyaswargo <i>et al.</i> (2012); Hanandeh; El-Zein (2010); Banar <i>et al.</i> (2009); Ulukan; Kop (2009); Özeler <i>et al.</i> (2006); Zaman (2010); Erikssona <i>et al.</i> (2005); Cherubinia <i>et al.</i> (2009); Geng <i>et al.</i> (2010); Song <i>et al.</i> (2013); Arena <i>et al.</i> (2003); Yay (2015); Su <i>et al.</i> (2010)
TOPISIS	10	20,00%	Arikana <i>et al.</i> (2015); Mira <i>et al.</i> (2016); Dong <i>et al.</i> (2014); Nouri <i>et al.</i> (2014); Pires <i>et al.</i> (2011); Xia <i>et al.</i> (2010); Ulukan; Kop (2009); Su <i>et al.</i> (2010); Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Ekmekçioğlu <i>et al.</i> (2010)
PROMETHEE	8	16,00%	Vegoa <i>et al.</i> (2008); Arikana <i>et al.</i> (2015); Herva; Roca (2013); Lolli <i>et al.</i> (2016); Makan; Mountadar (2013); Panagiotidou <i>et al.</i> (2015); Lima <i>et al.</i> (2013); Lima <i>et al.</i> (2014)
ANP	3	6,00%	Tseng (2009); Nixon <i>et al.</i> (2013); Khan <i>et al.</i> (2008)
GAIA	3	6,00%	Vegoa <i>et al.</i> (2008); Herva; Roca (2013); Makan <i>et al.</i> (2003)
Programação linear	3	6,00%	Tana <i>et al.</i> (2014); Xia <i>et al.</i> (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010)
VIKOR	3	6,00%	Mira <i>et al.</i> (2016); Liua <i>et al.</i> (2013); Vučijaka <i>et al.</i> (2014)
DSS	2	4,00%	Inglezakis <i>et al.</i> (2014); Inglezakis <i>et al.</i> (2016)
ELECTRE	2	4,00%	Hanandeh; El-Zein (2010); Perkoulidisa <i>et al.</i> (2010)
SAW	2	2,00%	Jovanovic <i>et al.</i> (2016); Thampi; Rao (2015)
CAM	1	2,00%	Hung <i>et al.</i> (2007)
Delphi	1	4,00%	Kharat <i>et al.</i> (2016)
DEMATEL	1	2,00%	Tseng (2009)
UrusSisa	1	2,00%	Manaf <i>et al.</i> (2008)

Anexo Artigo 2: Dados utilizados na aplicação do TOPSIS

Anexo B1: Dados utilizados para os critérios ambientais

	Toxicidade	Acidificação	Eutrofização (N,P,K)	Foto oxidante	Aquecimento Global (CO2)
Aterro	-0,17	0,13	0,06	0,45	2,74
Trat. Biológico	-1,0519	-0,1541	-0,067	0,0134	0,1273
Incineração	-0,1353	-0,0396	-0,231	-0,0165	1,0131
Integrado	-0,52	-0,14	-0,8	-0,05	2,13

Anexo B2: Dados utilizados para os critérios econômicos

	Custo inicial	Custo operacional	Receita
Aterro	R\$ 3.794.260,92	R\$ 271.018,63	R\$ 12.276.725,00
Trat. Biológico	R\$ 10.583.313,60	R\$ 1.111.932,65	R\$ 55.689.316,00
Incineração	R\$ 13.534.821,87	R\$ 736.958,44	R\$ 48.723.758,00
Integrado	R\$ 16.954.549,20	R\$ 1.325.630,65	R\$ 53.781.502,00

Anexo B3: Dados utilizados para os critérios sociais

	Nº de empregados	Odor	Impacto visual	Espaço urbano
Aterro	-1,05	-1,44	-0,71	-0,5
Trat. Biológico	-0,81	-1,4	-0,84	-0,5
Incineração	-0,85	-1,33	-0,85	-0,53
Integrado	-0,85	-1,37	-0,87	-0,64

Anexo B4: Dados utilizados para os critérios técnicos

	Complexidade	Taxa de recuperação	Redução da fração orgânica	Redução da fração inorgânica	Uso de energia
Aterro	-0,71	-0,92	97%	81,9%	-0,14
Trat. Biológico	-0,58	-0,42	20,2%	30,1%	-1,58
Incineração	-0,63	-0,42	60%	20%	-1,58
Integrado	-0,5	-0,25	0%	0%	-1,63