

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ROCHELE SANTOS DA CONCEIÇÃO

**USO DO MÉTODO AHP NA TOMADA DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE UMA
ROTA TECNOLÓGICA APLICADA AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS**

Caxias do Sul

2018

ROCHELE SANTOS DA CONCEIÇÃO

**USO DO MÉTODO AHP NA TOMADA DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE UMA
ROTA TECNOLÓGICA APLICADA AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS**

Estudo entregue como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Caxias do Sul, sob orientação do Prof. Dr. Geraldo Antônio Reichert e coordenação do Prof. Me. Tiago Panizzon.

Caxias do Sul

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as graças a mim concedidas, pelas oportunidades e por me guiar nesta etapa importante da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Alberi e Rosamari, pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Geraldo Antônio Reichert por todas as contribuições essenciais para realização deste trabalho.

A todos os professores que de alguma forma participaram desta etapa da minha vida, contribuindo no meu crescimento profissional e pessoal.

A equipe da Companhia de Desenvolvimento de Caxias do Sul (CODECA) pela atenção e pela disponibilização de inúmeras informações que fundamentaram este estudo.

Aos colegas pelo companheirismo e ajuda, agradeço aqueles que se tornaram muito mais que colegas e que pretendo levar a amizade pra vida, em especial a Manuela e Nicole.

Aos amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado, torcendo por mim e comemorando minhas conquistas.

Ao meu companheiro, Dobby, que sempre esteve ao meu lado nas horas de estudo, às vezes me desconcentrando, mas sempre me fazendo feliz.

Ao meu parceiro e melhor amigo, Felipe, que esteve ao meu lado desde o começo desta trajetória, pela paciência, compreensão, incentivo e carinho.

RESUMO

Mesmo sendo um dos eixos do saneamento básico, o manejo dos resíduos sólidos não recebe a atenção e os investimentos necessários para que os resíduos deixem de se tornar apenas um problema, mas que tragam de alguma forma benefícios para a sociedade. No Brasil as soluções comumente utilizadas são as práticas de disposição no solo, sendo outras alternativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos pouco exploradas. Neste contexto, este estudo propõe a avaliação de rotas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul, utilizando o modelo de apoio à decisão Analytic Hierarchy Process (AHP) para hierarquização das alternativas e seleção da mais adequada para o manejo mais sustentável dos resíduos. Foram propostas quatro configurações de rotas tecnológicas, sendo estas apresentadas a especialistas convidados, atuantes na área de resíduos, que por meio da comparação por pares as avaliaram em relação aos critérios ambiental, social e econômico, e a subcritérios ligados a estes. Os valores que por mais vezes se repetiram em cada uma das comparações foram inseridas no *software Expert Choice*, que forneceu uma hierarquização das alternativas propostas. A classificada como melhor opção para o gerenciamento dos resíduos municipais de Caxias do Sul, foi a que se propôs a integração de tecnologias de reciclagem, compostagem, incineração e disposição final em aterro sanitário. Avaliando os resultados por critério, pode-se concluir que esta foi considerada como preferível em relação as dimensões ambiental e social, já referente ao critério econômico, esta ocupou o terceiro lugar. Tendo em vista que esta proposta sugere a implementação de diferentes tecnologias, os investimentos financeiros requeridos são maiores, mas podem ser minimizados com a venda de materiais, composto e mesmo de energia gerada pelo processo de queima. A fim de verificar a confiabilidade dos dados utilizados para aplicação do método foi realizada uma análise de sensibilidade, na qual pode-se concluir que os resultados somente sofreriam alterações se o econômico representa-se mais de 50% da preferência em relação aos demais. A metodologia multicritério mostrou-se como uma ferramenta capaz de auxiliar no processo decisório, permitindo a consideração de diversos fatores de avaliação e a integração de diferentes opiniões, podendo ser utilizada pelos gestores públicos para as mais diversas situações de análises e conflitos. O modelo é de fácil compreensão e eficaz para comparação entre diferentes alternativas ou frente a um problema de múltiplas escolhas, como na seleção de uma rota tecnológica para os resíduos sólidos, em que foi possível avaliar os ganhos que poderiam ser alcançados em relação da cada proposta. O método aplicado neste estudo pode ser replicado a outras regiões, a fim de propor opções alternativas aos atuais cenários de gerenciamento de resíduos.

Palavras-chave: Gestão de resíduos, Apoio à decisão, Análise multicritério, Analytic hierarchy process (AHP), Tratamento de resíduos.

ABSTRACT

The solid waste management in Brazil, one of the axes of the basic sanitation, does not receive the necessary attention and investments to help ensure that this is no longer only a problem, but that they can bring benefits to society. The most common solutions used in Brazil are the disposal practices in the soil while other alternatives for the management of the solid waste remain underused. In this context, this study proposes the evaluation of technological routes for the management of urban solid waste in the city of Caxias do Sul, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) decision support model to hierarchy of alternatives and selection of the most appropriate for the most sustainable management of waste. Four configurations of technological routes were proposed and were presented to invited experts, people who work directly in solid waste area, and then by pair-wise comparison evaluated the purposes linked to the environmental, social and economic criteria and to sub criteria related to them. The values that were repeated more often in each of the comparisons were inserted in the Expert Choice software. The software provided a hierarchy of the proposed alternatives. The technology route selected as the best option for the municipal waste management in Caxias do Sul was the one that integrates the technologies of recycling, composting, incineration and final disposal in landfill. Evaluating the results by criterion, it was concluded that this purpose was considered preferable in relation to the environmental and social dimensions, but referring to the economic criterion, it occupied only the third place in the order of preference. Considering that this proposal suggests the implementation of different technologies, the financial investments required are greater, but they can be minimized by the sale of materials, composite and even energy generated by the burning process. A sensitivity analysis was performed, in order to verify the reliability of the data used to apply the method, and then it can be concluded that the results would only change if there were significant changes in the weights attributed to the criteria, in which the economic represents more than 50% of the preference. The multi-criteria methodology proved to be a capable tool of assisting in the decision-making process, allowing the consideration of several evaluation factors and the integration of different guest's opinion, and it is possible to be used by public managers for the most diverse situations of analysis and conflicts. The model is easy to understand and effective for comparing different alternatives or facing a problem of multiple choices, such as the selection of a technological route for solid waste, in which it was possible to evaluate the gains that could be achieved in relation to each proposal. It is possible to apply the method used in this study for other regions in order to propose alternative options to the current solid waste management scenarios.

Key words: Waste management, Decision support, Multi-criteria analysis, Analytic hierarchy process (AHP), Waste treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação de rota tecnológica para gestão de resíduos sólidos	33
Figura 2 - Exemplificação da estrutura do modelo AHP	38
Figura 3 - Etapas metodológicas	41
Figura 4 - Critérios e subcritérios	43
Figura 5 - Matriz de comparação paritária.....	45
Figura 6 - Localização da área de estudo, Município de Caxias do Sul	48
Figura 7 - Rota tecnológica atual do Município de Caxias do Sul	51
Figura 8 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos da coleta de mistos	52
Figura 9 - Composição gravimétrica referente à coleta de resíduos sólidos mistos, considerando as porções de recicláveis, matéria orgânica e rejeitos.....	53
Figura 10 - Composição gravimétrica dos resíduos da coleta seletiva.....	54
Figura 11 - Representação das rotas tecnológicas propostas para Caxias do Sul ...	56
Figura 12 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 1	59
Figura 13 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 2.....	60
Figura 14 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 3.....	61
Figura 15 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 4.....	62
Figura 16 - Hierarquização referente aos critérios considerados	63
Figura 17 – Hierarquia do problema de decisão.....	76
Figura 18 – Pesos relacionados a cada critério e alternativa de rota tecnológica	77
Figura 19 – Hierarquia de prioridade e índice de inconsistência de dados	78
Figura 20 – Hierarquia de preferencia após análise de sensibilidade considerando a variação do critério econômico	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores para comparações paritárias.....	38
Quadro 2 - Valores do índice de consistência em relação ao número de critérios....	46
Quadro 3 - Descrição das rotas tecnológicas propostas para Caxias do Sul.....	57
Quadro 4 - Comparação par a par entre os critérios considerados.....	70
Quadro 5 - Ordem de preferencia dos critérios de avaliação	70
Quadro 6 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão ambiental.....	71
Quadro 7 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão social	73
Quadro 8 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão econômica	74
Quadro 9 - Prioridade das alternativas de rotas tecnológicas	75
Quadro A.B. 1 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes aos critérios de avaliação.....	93
Quadro A.B. 2 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério ambiental).....	93
Quadro A.B. 3 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério econômico).....	93
Quadro A.B. 4 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério social).....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	AHP - Analytic Hierarchy Process
CODECA	Companhia de Desenvolvimento de Caxias do Sul
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DA	Digestão anaeróbia
DSM	Decision Support Model
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MCP	Matriz de comparações paritárias
MCDA	Multi-criteria Decision Analysis
MO	Matéria orgânica
NBR	Norma Brasileira
PEV	Pontos de Entrega Voluntária
PGRS	Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSD	Resíduos sólidos domiciliares
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
3.2. ASPECTOS LEGAIS	17
3.3. TECNOLOGIAS CONSIDERADAS PARA O GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	20
3.3.1 Coleta e transporte	21
3.3.2 Triagem	23
3.3.2.1. Triagem - Resíduos previamente separados	23
3.3.2.2. Triagem - Resíduos mistos	24
3.3.3. Estação de transbordo	25
3.3.4. Reciclagem	25
3.3.5. Tratamento biológico – Compostagem	26
3.3.6. Tratamento biológico – Digestão anaeróbia	28
3.3.7. Incineração	29
3.3.8 Aterro sanitário	30
3.4. ROTAS TECNOLÓGICAS	32
3.5. MODELOS DE APOIO À DECISÃO	33
3.5.1. Modelos baseados em análise multicritério	36
3.5.2. Método AHP - Analytic Hierarchy Process	37
3.5.3. Aplicações do método AHP	39
4. METODOLOGIA	41
4.1. ETAPAS DE PESQUISA	41
4.1.1 Etapa 1 – Rota tecnológica atual	41
4.1.2 Etapa 2 – Proposição de novas rotas tecnológicas	42
4.1.3 Etapa 3 – Critérios de avaliação	42
4.1.4 Etapa 4 - Questionário	43
4.1.5 Etapa 5 – Aplicação do método AHP	44
4.1.6 Etapa 6 – Análise dos resultados	46
5. ESTUDO DE CASO – MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL	47
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47

5.1.1	Descrição do cenário atual	49
5.1.2	Composição gravimétrica dos RSU de Caxias do Sul	51
6.	PROPOSTAS DE ROTAS TECNOLÓGICAS E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ..	55
6.1.	ROTAS TECNOLÓGICAS PROPOSTAS	55
6.2.	FLUXOS DE MASSA DAS ROTAS TECNOLÓGICAS PROPOSTAS	58
6.2.1.	Fluxo de massa ROTA 1	58
6.2.2.	Fluxo de massa ROTA 2	59
6.2.3.	Fluxo de massa ROTA 3	60
6.2.4.	Fluxo de massa ROTA 4	62
6.3.	HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	63
6.4.	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	63
6.4.1	Dimensão ambiental	64
6.4.1.1.	Área útil.....	64
6.4.1.2.	Percentual de redução de volume pós-tratamento.....	64
6.4.1.3.	Tipo de poluente emitido a atmosfera	65
6.4.1.4.	Percentual de massa destinada à disposição final pós-tratamento.....	65
6.4.1.5.	Riscos de contaminação do solo e recursos hídricos	65
6.4.2.	Dimensão social.....	66
6.4.2.1.	Aceitação pública	66
6.4.2.2.	Geração de emprego e renda	66
6.4.2.3.	Impactos na vizinhança.....	66
6.4.2.4.	Qualidade de vida dos trabalhadores (riscos ocupacionais)	67
6.4.3.	Dimensão econômica.....	67
6.4.3.1.	Custo total de investimento para implantação da rota tecnológica	67
6.4.3.2.	Custos com manutenção/ operação.....	67
6.4.3.3.	Custo unitário por habitante	68
7.	RESULTADOS	69
7.1.	HIERARQUIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO.....	69
7.2.	HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO AMBIENTAL.....	71
7.3.	HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO SOCIAL.....	73
7.4.	HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO ECONÔMICA.....	74
7.5.	HIERARQUIZAÇÃO GLOBAL DAS ALTERNATIVAS.....	75

7.6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO SOFTWARE <i>EXPERT CHOICE</i>	76
7.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	78
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
9. LIMITAÇÕES	83
10. RECOMENDAÇÕES	84
REFERÊNCIAS	85
Apêndice A - QUESTIONÁRIO APLICADO PARA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO AHP	92
Apêndice B - CONTRIBUIÇÕES DOS ESPECIALISTAS CONVIDADOS	95
Apêndice C - ARTICO CIENTÍFICO	97

1. INTRODUÇÃO

Juntamente ao crescimento populacional, a industrialização, os atuais padrões de produção de bens descartáveis e os hábitos de consumo da população são os grandes desafios enfrentados nos últimos anos pela sociedade, tendo em vista que a estes está atrelada a intensificação da exploração dos recursos naturais disponíveis e a consequente geração de grandes quantidades e tipologias de resíduos.

A problemática relacionada aos resíduos é associada principalmente com à disposição final inadequada, devido a este ser um problema visível à população, tendo como consequência a ocorrência de sérios impactos ambientais, como degradação de áreas e a contaminação do solo e de recursos hídricos.

A dificuldade em relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos gerados pela sociedade tem relação com diversos fatores, como a complexidade apresentada por estes, devido às suas distintas composições, a escolha de áreas para disposição final, a deficiência dos sistemas de gestão e, sobretudo, devido aos custos associados às tecnologias de tratamento e disposição conhecidas (LIMA, 2012; JUCÁ *et al.*, 2014).

Após entrar em vigor no ano de 2010, a Lei Federal 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), contribuiu com avanços expressivos, relacionados a valorização dos catadores, ao estímulo a práticas de consumo sustentável, incentivo a reciclagem e responsabilização de toda a sociedade para o correto manejo dos resíduos gerados (BRASIL, 2010). Mesmo apresentando progresso, o Brasil ainda enfrenta problemas associados ao cumprimento das diretrizes impostas por esta legislação.

Conforme informações do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do ano de 2016 (BRASIL, 2017), 49,5 milhões de toneladas de resíduos domiciliares e públicos foram coletadas no país, correspondendo a uma amostra de 145 milhões de habitantes, cerca de 83% da população urbana do país.

Tento em vista que no Brasil ainda existe um grande número de lixões e aterros controlados, 1.831 unidades de acordo com o diagnóstico, uma parte significativa deste montante de resíduos, ainda é destinado de forma inadequada. Desta forma, juntamente com resíduos não recolhidos pelos sistemas de coleta e por consequência destinados inadequadamente, os coletados, mas enviados para

destinação final incorreta, não somente causam grandes impactos ao meio ambiente, mas também colocam em risco o bem estar e a saúde da população.

Problemas na gestão dos resíduos sólidos urbanos podem existir devido a diversas razões, como a falta de investimentos e desenvolvimento de tecnologias de tratamento e disposição, bem como devido a falta de desenvolvimento de programas voltados à educação ambiental da população para sensibilização acerca da importância do correto gerenciamento dos resíduos, da separação das diferentes tipologias de resíduos nas fontes geradoras, além dos objetivos descritos na PNRS (JUCÁ *et al.*, 2014). Entre estes, a não geração, a redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, definidos como resíduos sólidos que tiveram suas possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis esgotadas, não havendo alternativa se não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Em termos gerais, o desenvolvimento sustentável é expresso como o suprimento das necessidades das atuais gerações, sem o comprometimento as possibilidades de sobrevivência das gerações futuras (FOLADORI, 2001). Na busca por um desenvolvimento sustentável na área dos resíduos sólidos urbanos, ações são necessárias, como a universalização da coleta de resíduos, análise dos percursos realizados pelos veículos de coleta e da necessidade da implantação de estações de transbordo, criação de associações de recicladores, além de avaliação de novas configurações de sistema para melhor aproveitamento dos resíduos (MERSONI, 2015).

Segundo dados disponibilizadas no Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (BRASIL, 2016), estima-se que entre as diversas unidades de processamento dos resíduos sólidos urbanos existentes no Brasil as mais comuns são as unidades por disposição no solo, sendo estas, lixões, aterros sanitários e aterros controlados, representando 64% de um total de 3.969 unidades cadastradas. Após estas, têm-se as unidade de triagem, com 23%, transbordo, com 3% e compostagem, com cerca de 1,7%. Do montante de 68,6 milhões de toneladas de resíduos destinados às unidades de processamento no ano de 2016, 74% da massa de resíduos é encaminhada a lixões, aterros controlados e sanitários. Mesmo não abrangendo os dados de todos os municípios do país, os mesmos evidenciam a realidade de grande parte do território brasileiro, em que os aterros sanitários são a

tecnologia de disposição mais utilizada, e que outras opções ainda são pouco exploradas.

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos gerados abrange a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes (BRASIL, 2010). Sendo assim, soluções isoladas e a utilização de apenas uma alternativa para os resíduos sólidos não se apresentam como adequadas para solucionar os problemas existentes. Desta forma, a análise das rotas tecnológicas utilizadas nos municípios é de suma importância para o diagnóstico da atual situação e para busca de melhorias.

Conforme Jucá *et al.* (2014), rota tecnológica dos resíduos sólidos urbanos pode ser definida como um conjunto de processos, tecnologias e fluxos envolvidos no gerenciamento dos resíduos, desde a geração até o destino final, envolvendo os circuitos de coleta diferenciados ou não, contemplando o fluxo de tecnologias de tratamento com ou sem valorização energética.

Para solucionar os problemas referentes ao manejo dos resíduos é fundamental a realização de planejamento prévio e contínuo quanto às rotas tecnológicas utilizadas, bem como estudos e análises acerca da melhor configuração de sistema e integração de diferentes tecnologias, avaliando as vantagens e desvantagens, levando em consideração as características de cada região, além de aspectos ambientais e sociais, não apenas aspectos econômicos, visto que por muitas vezes este acaba se sobressaindo frente aos demais.

Na busca de soluções para os atuais problemas enfrentados, decisões importantes quanto ao manejo dos resíduos sólidos devem ser tomadas pelos gestores municipais. Estas devem ser apoiadas nos três pilares da sustentabilidade: economicamente viável, socialmente aceitável e ecologicamente correta. A decisão pode ser definida como um processo de análise e escolha entre diversas alternativas disponíveis, buscando a melhor opção a ser seguida (MARINS; SOUZA; BARROS, 2009). Desta forma, tendo em vista a complexidade das escolhas a serem realizadas, devido ao grande número de fatores e critérios envolvidos, a tomada de decisão deve ser realizada com cautela e atenção.

Para auxiliar os gestores na hora da escolha das tecnologias mais apropriadas para integrarem a rota tecnológica a ser utilizada em uma região, existem ferramentas como os modelos de apoio à decisão (DSM – *Decision Support*

Model), que podem ser utilizados como suporte a tomada de decisão, possibilitando que sejam considerados diferentes critérios e alternativas, além de facilitar a comunicação entre as partes interessadas, sendo aplicados nas mais diversas áreas e problemáticas, inclusive para gestão sustentável dos resíduos sólidos (DEWI *et al.*, 2010; SOLTANI, 2014; COBAN *et al.*, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho tem o intuito de contribuir para análise de diferentes opções para o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados em Caxias do Sul, podendo auxiliar os gestores municipais na tomada de decisão em relação às alternativas disponíveis que atendam a realidade do município, evidenciando aspectos importantes e fundamentais através da utilização do modelo de apoio a decisão AHP.

2. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor a avaliação de rotas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul (RS), através da utilização do modelo de apoio a decisão AHP (Analytic Hierarchy Process), para hierarquização das alternativas e seleção da mais adequada considerando as dimensões ambiental, social e econômica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as tecnologias de tratamentos e disposição de resíduos sólidos urbanos aplicáveis para o município de Caxias do Sul;
- Elaborar propostas de rotas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no município;
- Propor critérios e subcritérios para análise da rota tecnológica mais adequada dentre as propostas, para o gerenciamento sustentável dos resíduos sólidos urbanos;
- Aplicar o modelo de apoio à decisão AHP para hierarquização das rotas propostas;
- Realizar análise de sensibilidade para identificação de possíveis mudanças nos resultados, por meio da alteração dos pesos atribuídos aos critérios de avaliação;
- Avaliar os resultados obtidos pelo modelo AHP, bem como avaliar as vantagens e desvantagens apresentadas pela rota tecnológica considerada mais adequada.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Existem diversas definições para os resíduos sólidos. Os mesmos podem ser descritos como um subproduto das atividades humanas, contendo os mesmos materiais presentes nos produtos originais, sendo descartados por serem consideradas sem valor pelo seu proprietário (MCDOUGALL *et al.*, 2001). Para Monteiro (2001), resíduos sólidos podem ser descritos como todo material em estado sólido ou semissólido, indesejável, que necessita ser removido uma vez que é considerado inútil por quem o descarta.

De acordo com a NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólidos e semissólidos, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Nesta definição também são abrangidos os lodos de sistemas de tratamento de água, os gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição, bem como líquidos que possuem características que impeçam seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos de água, exigindo soluções técnicas e econômicas inviáveis.

A PNRS, Lei nº 12.305/10, define em seu Artigo 3º, inciso XVI, os resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Segundo esta mesma legislação, os termos resíduos sólidos e rejeitos possuem definições diferentes. Os rejeitos são definidos como resíduos sólidos que não apresentam outra possibilidade se não a disposição final ambientalmente adequada, visto esgotadas suas possibilidades de tratamento e recuperação por tecnologias disponíveis e economicamente viáveis (BRASIL, 2010). Conhecendo estas definições, entende-se que somente os rejeitos deveriam ser destinados à

disposição final adequada, uma vez que os materiais passíveis a outras destinações poderiam ser encaminhados a processos de recuperação e tratamento.

Tendo em vista as diferentes tipologias de resíduos gerados diariamente pela sociedade e buscando determinar a melhor alternativa para o gerenciamento para os mesmos, estes podem ser classificados baseando-se em diferentes critérios. Segundo McDougall *et al.* (2001), a classificação pode ser baseada pelo estado físico (sólido, líquido e gasoso), uso original, como embalagens ou restos de alimentos, material, propriedades físicas, de acordo com sua origem, considerando o processo ou atividade em que foram gerados, e também por sua periculosidade.

Quanto à fonte de origem, estes podem ser classificados segundo a PNRS como: residenciais ou domiciliares, de limpeza urbana, comerciais e institucionais, de serviços públicos, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, de transporte, mineração e agrossilvopastoris. Sendo que os resíduos sólidos domiciliares (RSD), originados de atividades domésticas em residências, e os resíduos de limpeza urbana, originados de varrição, limpeza de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza, são englobados como resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2010).

A avaliação da periculosidade de um resíduo baseia-se em suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, verificando se estes podem apresentar riscos à saúde pública ou ao meio ambiente. Os resíduos podem ser classificados como perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II). Um resíduo é classificado como perigoso quando este apresenta características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Os resíduos classificados como não perigosos podem ser divididos em duas categorias, inertes, com o tempo não se decompõem ou sofrem alterações em sua composição, e não inertes, apresentam propriedades como biodegradabilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

3.2. ASPECTOS LEGAIS

Atualmente existem diversas legislações, resoluções e normas relacionadas ao meio ambiente e as mais diversas tipologias de resíduos sólidos. Estas servem como diretrizes para o correto gerenciamento dos RSU. Na sequência são

apresentados alguns dos documentos legais que serviram como suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

A preocupação com relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos teve início principalmente devido aos riscos à saúde da população, conforme se evidencia com a instituição da Lei 2.312 no ano de 1954, que estabeleceu condições de coleta, transporte e destinação final dos resíduos sólidos, de forma que estes não provocassem inconvenientes à saúde e ao bem-estar público (BRASIL, 1954).

Um dos primeiros instrumentos legais voltado para área ambiental do país foi a Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), sendo criada com o objetivo de preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental (BRASIL, 1981).

A fim de garantir a qualidade ambiental, multas e punições podem ser aplicadas àqueles que causarem danos ao meio ambiente. A Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e dá outras providências. Em seu Artigo 54, traz punições para os responsáveis de causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora. Podendo a pena ser agravada se este ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos (BRASIL, 1998).

Em 2010 foi instituída a Lei nº 12.305, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sendo um importante instrumento para o país, estabelecendo definições, princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Entre os objetivos da PNRS, estão a priorização da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos gerados, além da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, bem como o incentivo à indústria de reciclagem e a integração de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

No Estado do Rio Grande do Sul, a gestão dos resíduos sólidos urbanos foi instituída pela Lei Nº 9.921, de 27 de julho de 1993 (RIO GRANDE DO SUL, 1993). Seu Artigo 1º determina que a segregação dos resíduos deve ser realizada na

origem, visando desta forma seu reaproveitamento otimizado, sendo esta de responsabilidade de toda a sociedade. O reaproveitamento dos resíduos sólidos é enfatizado neste instrumento, sendo estabelecido que os municípios devem priorizá-lo por meio dos serviços de coleta segregativa ou pela implantação de projetos de triagem de recicláveis e aproveitamento da fração orgânica. A segregação dos resíduos visando seu aproveitamento também é determinada na Lei nº 11.520, de agosto de 2000, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Sul.

Em 2014, cerca de quatro anos após a PNRS, foi instituída no Rio Grande do Sul, a Lei nº 14.528, que refere-se à Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos. Entre os princípios determinados está a visão sistêmica na gestão dos resíduos, em que variáveis ambientais, sociais, culturais, econômicas, tecnológicas e de saúde pública devem ser considerados. Entre os objetivos estão os incentivos à indústria da reciclagem, estimulando o uso de matérias primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

Considerando os documentos legais do município de Caxias do Sul, destaca-se a Lei Complementar nº 376, de 22 de dezembro de 2010, que institui a Política Municipal do Meio Ambiente, e objetiva em seu Artigo 1º a responsabilidade comum do Poder Público Municipal e do cidadão em proteger o ambiente, assegurar o direito da sociedade a uma vida saudável e garantir o atendimento das necessidades das gerações presentes e futuras (CAXIAS DO SUL, 2010).

A mesma legislação define em seu Artigo 93, que a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos, sendo estes de qualquer natureza, devem ser realizados de forma que não tragam malefícios ou inconvenientes à saúde e ao bem-estar da população, bem como para o meio ambiente.

Em 2016 foi instituído o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Caxias do Sul, Lei nº 8.183. Em seu Artigo 3º, é enfatizada a importância deste instrumento de planejamento da gestão integrada de resíduos sólidos e manejo dos serviços de limpeza pública no município (CAXIAS DO SUL, 2016).

3.3. TECNOLOGIAS CONSIDERADAS PARA O GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para Ibrahim (2015), o gerenciamento dos resíduos consiste no conjunto de ações diretas ou indiretas, envolvendo as etapas de coleta, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos e dos rejeitos.

D'Almeida e Vilhena (2000) definem gerenciamento integrado dos resíduos sólidos municipais como conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento, desenvolvidas pela administração pública, baseados em critérios sanitários, ambientais e econômicos, para as etapas de coleta, segregação, tratamento e disposição final. Esta é uma forma diferenciada para o manejo dos resíduos, incorporando uma hierarquia de gerenciamento, que vai desde a geração, passa pelo manejo, coleta, transporte, processamento e finaliza na disposição final, buscando a utilização de distintas formas de coleta e tratamento para contemplação de todas as tipologias de resíduos (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; WHITE *et al.*, 1995).

A PNRS, trás a definição dos termos gerenciamento de resíduos e gestão integrada. O primeiro é descrito como:

Conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei (BRASIL, 2010).

Segundo a mesma, o termo gestão integrada é definido como o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, considerando as dimensões políticas, econômicas, ambientais, culturais e sociais, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

Para que um sistema de gerenciamento seja efetivo, devem ser abrangidos diferentes serviços e tecnologias. O gerenciamento ambiental deve incorporar uma concepção de gestão multidisciplinar, contemplando conhecimentos de diversas áreas da ciência, além de despertar uma consciência coletiva quanto às responsabilidades individuais (SCHNEIDER; STEDILE, 2015).

Tendo em vista que existem diversas tecnologias utilizadas para o tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, devem-se avaliar quais

são mais adequadas para cada região, a fim de alcançar um sistema sustentável de gerenciamento de resíduos, para aproveitamento dos RSU, trazendo melhorias para a sociedade de uma maneira geral, com geração de emprego e valorização dos resíduos.

A seguir são apresentadas as tecnologias consideradas neste trabalho para o gerenciamento de resíduos do município de Caxias do Sul.

3.3.1. Coleta e transporte

A coleta dos RSU é definida como o ato de recolher e transportar resíduos sólidos de qualquer natureza, utilizando veículos e equipamentos apropriados para tal fim (ABNT, 1993). Existem diferentes tipos de coletas de resíduos, as que estes não são previamente segregados nas fontes geradoras, e também aquelas em que eles são separados em diferentes tipologias.

Neste trabalho, ao tratar-se da coleta dos resíduos sem prévia separação, conhecida popularmente como coleta orgânica, a qual é composta principalmente por matéria orgânica, resíduos sanitários e outros resíduos classificados como rejeitos, serão adotados os termos 'coleta de resíduos mistos' ou "coleta de mistos'. Optou-se pelo uso destes termos uma vez que nesta coleta encontram-se diferentes tipologias de resíduos, como os já citados e outros como recicláveis que deveriam ser encaminhados pela população para coleta seletiva existente no município. Desta forma, chamar de coleta orgânica não seria o mais adequado, uma vez que não são apenas encontrados resíduos orgânicos e sim uma diversidade de tipologias, justificando o uso destas expressões.

A coleta de resíduos sólidos pode ser classificada como regular, especial, seletiva ou particular. A primeira abrange as coletas domiciliares, dos resíduos de feiras, praias e calçadões, com riscos para saúde, de serviços de saúde e de varredura. Já a coleta especial refere-se aos resíduos especiais não recolhidos pela coleta regular em razão de suas características. A coleta particular de resíduos consiste no recolhimento de qualquer tipologia, realizado por pessoas físicas ou empresas, individualmente ou em grupos limitados, podendo estes, por meio de pagamento, solicitar sua execução por terceiros. Por fim, a coleta seletiva, que consiste na remoção de resíduos previamente separados pelos geradores, é ferramenta determinante, tendo em vista que a separação dos resíduos no local de

origem é fundamental uma vez que esta causa um impacto direto nas etapas posteriores do gerenciamento (ABNT, 1995).

Entre os princípios da PNRS, está a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Esta por sua vez, responsabiliza fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, além dos consumidores, pela gestão adequada dos resíduos, priorizando a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

A coleta seletiva é um dos instrumentos utilizados para aplicação deste princípio, sendo definida de acordo com PNRS, como recolhimento dos resíduos sólidos previamente segregados de acordo com seus constituintes e composição. Esta é uma importante ferramenta, tendo em vista que pode promover a valorização de materiais, geração de renda e inclusão social por meio dos materiais recicláveis, além da conscientização da população acerca das questões ambientais.

As coletas comumente são realizadas de duas formas, coleta porta-a-porta e entregas voluntárias. No primeiro modelo de coleta, veículos, como caminhões compactadores, percorrem ruas coletando os resíduos de domicílios e comércios localizados no trajeto. Nas entregas voluntárias, o próprio gerador leva seus resíduos até os locais de recebimento, denominados como Pontos de Entrega Voluntária (PEV). Nestes existem dispositivos, como contêineres, para o armazenamento temporário dos resíduos e posterior coleta, sendo estes localizados em pontos estratégicos como próximos a conjuntos residenciais ou edificações (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018).

Como características dos sistemas de coletas alguns pontos podem ser destacados. No modelo porta-a-porta, os custos são mais elevados, devido principalmente às distâncias percorridas pelos veículos de coleta e a manutenção com os dispositivos disponibilizados para o armazenamento temporário dos resíduos. Os PEV também necessitam de investimentos periódicos, para manutenção do ponto, retirada e destinação dos resíduos. A participação da população nesta modalidade pode ser menor, uma vez que os habitantes devem levar seus resíduos até os pontos de armazenamento (BERNARDO e DA SILVA LIMA, 2015).

3.3.2. Triagem

Tendo em vista a grande heterogeneidade apresentada pelos resíduos gerados pela população, sabendo da importância da reinserção da maior quantidade possível de materiais aos processos produtivos, é imprescindível que após a etapa de coleta os resíduos sejam enviados a unidades ou centrais de triagem para segregação.

No país são comumente utilizadas dois tipos de coleta de resíduos, sendo estas a seletiva e a de mistos, conforme já abordado. Assim, o processo de triagem depende fundamentalmente do tipo de coleta.

A eficiência da separação das diferentes tipologias de resíduos influencia diretamente nas etapas posteriores a serem consideradas no gerenciamento dos RSU. Para avaliação econômica e ambiental da utilização de métodos como a reciclagem de materiais e o tratamento biológico, deve-se considerar a correta segregação dos materiais, tendo em vista que para efetivação destas técnicas as práticas de separação dos resíduos são fundamentais uma vez que materiais contaminados acarretam na inviabilização dos métodos de tratamento.

A utilização conjunta de processos de separação e outras tecnologias são essenciais para o atendimento da PNRS, visto que estas determinam o encaminhamento somente de rejeitos à disposição final.

3.3.2.1. Triagem – Resíduos previamente separados

Mesmo com a implantação da coleta seletiva, em que os resíduos são previamente segregados em função de sua constituição ou composição (BRASIL, 2010), continua sendo importante que os materiais passem por triagem para correta separação das diferentes tipologias de recicláveis.

A triagem dos resíduos pode ser realizada de forma manual, mecanizada ou semimecanizada. Quando ocorre a coleta seletiva, a triagem manual é comumente utilizada, sendo considerada uma técnica relativamente simples, que consiste na separação dos resíduos dispostos em esteiras, realizada manualmente pelos trabalhadores, utilizando desta forma elevada quantidade de mão de obra.

Dentre os maiores problemas relacionados à separação manual está o bem-estar dos trabalhadores, que por muitas vezes realizam suas atividades em locais precários, sem segurança, não recebem as capacitações adequadas, passam

muitas horas em pé, aumentando dos riscos ergonômicos, e convivem com a probabilidade de contaminação devido a não utilização de equipamentos de proteção como luvas e óculos, sendo expostos a patógenos, correndo o risco de contraírem doenças ou mesmo de se machucarem no processo. (PANIZZON, 2010; CAMPOS *et al.*, 2014; BRITO, 2016). Estes fatos acarretam na baixa eficiência de separação atribuída a esta forma de triagem, mas por outro lado esta é fonte geradora de emprego e renda a diversas famílias.

3.3.2.2. Triagem - Resíduos mistos

Uma vez que não ocorre a separação dos resíduos nas fontes geradoras, para a utilização de tecnologias de aproveitamento ou transformação de materiais torna-se fundamental que estes sejam enviados a processos de triagem.

Materiais contaminados inviabilizam outras destinações, como no caso dos resíduos orgânicos, que se contaminados com metais pesados ou restos de medicamentos, por exemplo, não são aptos para compostagem, tendo em vista que resultaram em um produto contaminado, perdendo o valor de mercado, evidenciando problemas com a separação dos resíduos (REICHERT, 2013).

Quando não existe uma separação prévia por parte da população, como é o caso de localidades onde não existe a coleta seletiva, o método de triagem torna-se mais demorado e complexo, como no caso da triagem mecanizada (FEAM, 2005).

Esta conta com equipamentos para separação das diferentes tipologias através da utilização de dispositivos para redução de volume, peneiras, separadores magnéticos, entre outros, baseando-se na separação por diversos critérios como tamanho, densidade e magnetismo (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Para Jucá *et al.* (2014), a utilização de sistemas mecanizados é recomendada para unidades com capacidade diária de tratamento superior a 15 toneladas, visto que municípios de médio e grande porte apresentam melhores condições para a implementação deste tipo de sistema.

As unidades de triagem de resíduos mistos exercerem um papel fundamental levando em consideração à influência direta que esta exerce sobre outras tecnologias, como no aproveitamento da fração orgânica para compostagem e conseqüente redução do volume de resíduos dispostos em aterros, não sendo necessária a alteração dos sistemas de coleta, mas sim mudanças no destino

destas. Em contrapartida, os pontos negativos estão relacionados aos investimentos iniciais com maquinários, custos com manutenção e pessoal capacitado, além da necessidade da existência de mercados para os materiais triados para que os benefícios sejam visíveis (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000; MELO, 2011; SANTOS, 2017).

3.3.3. Estação de transbordo

As estações de transbordo consistem em instalações onde ocorre a transferências dos resíduos recolhidos por veículos coletores, para outros veículos com maiores capacidades de armazenamento. Estes por sua vez, transportam os resíduos até sua destinação final (NUNES e SILVA, 2015).

Conforme Monteiro (2001), as grandes distâncias entre os centros urbanos e as áreas de disposição final, são relacionadas a não aceitação da população quanto à implantação de empreendimentos associados à disposição final de resíduos e os custos dos terrenos urbanos para implantação das tecnologias de disposição.

As instalações de transferência normalmente são implantadas quando a distância entre o centro urbano e o local de disposição é superior a 25 km, e também apresentam viabilidade econômica quanto as distâncias percorridas são superiores a 6 km para caminhões convencionais e entre 12 e 25 km para caminhões compactadores (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000; MONTEIRO, 2001).

Com a implantação destas instalações intermediárias busca-se reduzir a frota de veículos coletores, conseqüentemente minimizando os impactos ambientais causados por estes, como a emissão de gases do efeito estufa (ECOURBIS, 2018). As estações de transbordo também trazem vantagens como a redução de custos, maior eficiência e rapidez de coleta.

3.3.4. Reciclagem

A PNRS define a reciclagem como um processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa (BRASIL, 2010).

Para Jucá *et al.* (2014), a reciclagem consiste no aproveitamento e transformação de resíduos, como papéis, plásticos, vidros e metais, por meio do seu retorno à indústria, para serem beneficiados e novamente transformados em produtos comercializáveis. Já Barsano (2014), define reciclagem como um conjunto de técnicas utilizadas com a finalidade de aproveitar detritos e resíduos inutilizados e reutiliza-los em um novo ciclo de produção, aplicando-os como matéria prima para novos produtos.

A reciclagem visa o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria prima para um novo produto, podendo retornar ao sistema produtivo, por meio de um processo industrial que contribui para diminuição dos impactos socioambientais, preservação de recursos naturais, economia de energia, aumento da vida útil dos aterros, diminuição de gastos públicos, além de ser uma fonte de emprego e renda (MONTEIRO *et al.*, 2011; BARBOSA, 2014).

Entre os princípios e objetivos da PNRS, estão o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, além do incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados, ferramenta esta, importante tanto para o meio ambiente, como para a população.

A reciclagem depende da separação correta dos resíduos, sendo fundamental a realização desta por parte da população, a implantação de coleta seletiva e processos de triagem.

3.3.5. Tratamento biológico – Compostagem

A compostagem é considerada uma alternativa viável para o gerenciamento da fração orgânica dos resíduos, sendo relatado como um processo simples, rápido e de fácil implementação (JARA-SAMANIEGO, 2017).

Ibrahin *et al.* (2015) definem compostagem como um processo biológico de decomposição e reciclagem da matéria orgânica (MO) contida em restos de origem animal ou vegetal. Já Jucá *et al.* (2014) a caracterizam como um processo biológico de decomposição aeróbia da MO, contida em resíduos de origem animal ou vegetal, tendo como resultado final um produto que pode ser aplicado no solo para melhorar suas características de produtividade, sem ocasionar riscos ao meio ambiente.

A NBR 13.591, de março de 1996, define a compostagem como:

Processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições controladas de aerobiose e demais parâmetros, desenvolvido em duas etapas distintas: uma de degradação ativa e outra de maturação (ABNT, 1996).

Na primeira etapa do processo ocorrem reações bioquímicas de oxidação mais intensas, predominantemente termofílicas, onde ocorre um aumento da temperatura do sistema, podendo esta chegar a 60°C. A segunda etapa é de maturação, processo de humificação dos materiais orgânicos compostados, com predomínio de reações mesofílicas com temperaturas próximas a ambiente, cerca de 25° a 30°C (JUCÁ *et al.*, 2014)

Sendo este um processo controlado, segundo Lima (2000), parâmetros como aeração e umidade devem ser observados. O primeiro é fundamental para atividade biológica, devendo ser mantido em níveis adequados para possibilidade de uma decomposição mais rápida, sem presença de odores ruins, em virtude da granulometria e da umidade dos resíduos. Já o teor de umidade depende da granulometria, porosidade e grau de compactação, devendo ser mantida em torno de 50%, visto que muito baixa pode reduzir a atividade biológica, e se muito elevada pode prejudicar a aeração.

Como vantagens do processo destacam-se à redução da quantidade de matéria orgânica destinadas a aterros sanitários e conseqüente redução das emissões de gases de efeito estufa, colaborando também para diminuição da concentração da carga orgânica no lixiviado gerado, além da possibilidade de arrecadação, uma vez que o processo tem como produto final um composto com valor agregado (GOMES *et al.*, 2015; JARA-SAMANIEGO, 2017).

Este composto por ser rico em nutrientes, pode ser aplicado na agricultura como adubo, melhorando as condições do solo, aumentando a capacidade de retenção de água, reduzindo o potencial de erosão e escoamento superficial (FERNANDEZ NASCIMENTO, 2015).

Como desvantagens da técnica estão à necessidade de grandes áreas, liberação de odores desagradáveis se não mantidas as condições aeróbicas, geração de líquidos e gases que oferecem riscos de contaminação do meio ambiente e comprometimento da qualidade de vida se operada de forma incorreta. Além da dependência de uma separação eficiente dos RSU, tendo em vista que a

não segregação correta pode inviabilizar o processo, influência da tipologia de resíduos, uma vez que a qualidade do composto pode variar em função do tipo de resíduo, e da necessidade de mercado para venda do composto (JUCÁ *et al.*, 2014; FERNANDEZ NASCIMENTO, 2015).

Diferentes resíduos apresentam potencial para compostagem, como restos de frutas, raízes, legumes e verduras, esterco de animais, restos de comida, folhas, aparas de madeira, palha, folhas, serragem e restos de capina (IBRAHIN *et al.* 2015; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2017).

Mesmo sendo uma técnica largamente conhecida, ainda é pouco explorada. Segundo dados apresentados no último Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos de 2016, ainda que cerca de 50% da massa total de resíduos domiciliares representem matéria orgânica, existem apenas 67 unidades de compostagem no país, que recebem em média 0,5 % do montante de aproximadamente 68 milhões de toneladas de resíduos coletados nas unidades de processamento (BRASIL, 2017).

3.3.6. Tratamento biológico – Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) ou biogaseificação é o processo de degradação da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio, ocorrendo assim pela ação de microrganismos anaeróbios, tendo como produtos finais valoráveis biogás, formado por CO₂ (dióxido de carbono) e CH₄ (metano), e composto orgânico. Para que este seja de qualidade, o biossólido resultante da DA deve passar anteriormente por processo aeróbio (MCDUGALL *et al.*, 2001; JUCÁ *et al.*, 2014).

A decomposição da matéria orgânica neste processo ocorre em várias etapas, sendo estas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A maioria dos processos de DA tem como etapa inicial um pré-tratamento da massa de resíduos. Esta etapa pode ser a separação ou triagem dos materiais não biodegradáveis, seguido por trituração (JUCÁ *et al.*, 2014). Os resíduos encaminhados ao processo devem ser preferencialmente úmidos, como lodos residuais e restos de alimentos, uma vez que estes são difíceis de serem processados na compostagem (MCDUGALL *et al.*, 2001).

Conforme Reichert (2013), parâmetros como as taxas de alimentação, pH, temperatura, relação C/N, tempo de permanência dos resíduos no reator e forma de

mistura no interior do reator, são importantes para o processo, devendo ser controlados.

Segundo Jucá *et al.* (2014) entre as vantagens da DA estão o aumento da vida útil dos aterros, redução da fração orgânica consequentemente reduzindo problemas relacionados a odores desagradáveis e geração de lixiviado, maior geração de biogás, maior recuperação do biogás gerado, geração de biogás e composto orgânico sendo estes produtos valoráveis. Já como desvantagens estão a dependência de fatores como a localização, estação do ano, necessidade da realização de etapa posterior como processo de compostagem para estabilização, dificuldade de operação do sistema, por exemplo, a obstrução de canalização, necessidade de mão de obra qualificada para operação e monitoramento da planta, além de apresentarem menores taxas de crescimento bacteriano e de produção de novas células que os processos aeróbios, podendo desta forma serem considerados menos efetivos.

3.3.7. Incineração

Segundo Reichert (2013), o tratamento térmico de resíduos sólidos pode ser definido como a conversão destes em produtos como gases, líquidos e sólidos, gerando e liberando energia na forma de calor. Estes tratamentos podem ser diferenciados com base em suas necessidades de ar, como por exemplo, enquanto a combustão que pode ser realizada com excesso de ar ou utilizando uma quantidade exata de ar para combustão completa, a pirolise ocorre na ausência absoluta de oxigênio (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Entre estas tecnologias existentes para o tratamento dos RSU, está a incineração, que tem como objetivo o tratamento térmico e redução do volume de resíduos (JUCÁ *et al.*, 2014).

A NBR 11.175 de julho de 1990 define a incineração de resíduos sólidos como um processo de oxidação a alta temperatura capaz de destruir ou reduzir o volume, e recuperar materiais ou substâncias (ABNT, 1990).

A incineração é um processo de tratamento térmico que ocorre em elevadas temperaturas, na ordem de 800°C a 1000°C, sendo os gases de combustão mantidos a temperaturas em torno de 1.200°C, com excesso de ar e turbulência

elevada, para conversão total dos compostos orgânicos presentes nos RSU (ABNT, 1990; D' ALMEIDA e VILHENA, 2000; SÃO PAULO, 2014).

A energia recuperada neste processo pode ser utilizada para produção de calor e energia elétrica. Por sua vez, essa energia gerada, pode ser vendida, sendo uma fonte de receita para os municípios (LIMA, 2000).

Entre as vantagens apresentadas por esta tecnologia está a redução de volume, visto que dependendo da composição dos resíduos, a redução pode ser de até 90%, estabilização dos resíduos devido à oxidação dos componentes orgânicos, potencial de recuperação de energia podendo ser utilizada para geração de eletricidade, além da esterilização dos resíduos com a destruição de patógenos. Outras vantagens são a utilização das cinzas resultantes como cobertura do solo e a necessidade de áreas menores quando comparadas as áreas demandadas pelos aterros (MCDOUGALL *et al.*, 2001; NABAVI-PELESARAEI, 2017).

Diversos fatores devem ser considerados para avaliação da viabilidade econômica e técnica da utilização desta tecnologia, uma vez que esta apresenta muitas vantagens como as já mencionadas, mas também desvantagens muito relevantes como: elevados custos de instalação, operação e manutenção, a exigência de mão de obra qualificada, o potencial de geração de compostos tóxicos e corrosivos, e ainda a inviabilidade da técnica devido as características dos materiais, como por exemplo, materiais com elevada umidade. (D'ALMEIDA e VILHENA, 2000; JUCÁ *et al.*, 2014).

Conforme Jucá *et al.* (2014), os gases resultantes da combustão devem receber tratamento, antes de serem emitidos para atmosfera, uma vez que nestes estão presentes compostos como o dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO₂) e materiais particulados. Após comprovada a inertização das cinzas e escórias resultantes do processo, estas podem ser enviadas e dispostas em aterro sanitário, já os efluentes líquidos gerados também devem ser neutralizados e destinados a tratamento.

3.3.8. Aterro sanitário

Tchobanoglous *et al.* (1993) descrevem os aterros sanitários como instalações de engenharia para disposição de resíduos, projetadas e operadas para minimizar impactos tanto na saúde pública, quanto no meio ambiente. Já De

Carvalho Felicori *et al.* (2016) expõem que a disposição dos resíduos ocorre em área impermeabilizada, com recobrimento e compactação dos materiais com camadas sucessivas de solo.

Entre as definições da NBR 8.419, de abril de 1992, aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, é descrito como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

Este processo baseia-se em diferentes critérios de engenharia, além de atender normas de operação, para confinamento segura dos materiais, de modo que as atividades não apresentem riscos ao meio ambiente e a população, bem como atenda os padrões estabelecidos para operação do processo.

Para seleção dos lugares de instalação dos aterros, muitos fatores devem ser levados em consideração, como a preocupação dos moradores com questões acerca de ruídos, odores, dispersão de resíduos, tráfego, efeitos sobre os valores das propriedades, além de preocupações quanto à poluição das águas subterrâneas (MCDOUGALL *et al.*, 2001). Também devem ser avaliadas condições como o distanciamento dos centros geradores, uma vez que devido as características do processo espera-se que estes encontrem-se o mais distante possível, considerando os custos de transporte, facilidade de acesso a área, além da necessidade da realização de estudos referentes a topografia e hidrografia local, levantamentos geotécnicos entre outros (LIMA, 2004; PORTELLA e RIBEIRO, 2014; COLVERO, 2017).

Esta técnica é muito importante, devido ser o único meio de destinação dos rejeitos provenientes das demais tecnologias de tratamento, sendo recomendado em todas as rotas tecnológicas consideradas para os resíduos (JUCÁ *et al.*, 2014).

A PNRS determina o envio somente de rejeitos para os aterros, mas os RSU classificados como rejeitos mudam conforme a localidade, dependendo de fatores como a disponibilidade de processos tecnológicos para o tratamento dos resíduos e viabilidade de recuperação dos materiais. Desta forma, devem ser destinados a aterros, somente materiais que não apresentam possibilidade de recuperação ou mercado para aproveitamento.

Além da necessidade de impermeabilização, compactação e cobertura dos resíduos, os efluentes líquidos e gasosos resultantes do processo devem ser tratados, evitando assim a contaminação do meio ambiente e riscos à saúde. Desta forma, o sistema deve ser composto por estruturas de drenagem e tratamento de efluente e gases.

Os aterros sanitários, além de serem utilizados para disposição segura de resíduos, podem ser empregados para recuperação de áreas degradadas, como as utilizadas para atividades de mineração, e apresentam a possibilidade de recuperação energética, tendo em vista que o processo tem como subproduto a geração de biogás (REICHERT, 2013).

3.4. ROTAS TECNOLÓGICAS

Jucá *et al.* (2014) definem rotas tecnológicas como sendo um conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos, desde sua geração até o seu destino final, envolvendo circuitos de coleta, indiferenciados e diferenciados, e fluxo de tecnologias de tratamento, com ou sem valorização energética.

A rota tecnológica de resíduos pode combinar diferentes tecnologias, fazendo parte e sendo aplicadas a sistemas de gestão integrada dos RSU (COLVERO, 2014).

Uma vez que o gerenciamento de resíduos tem seu início nas atividades de coleta, sendo estas diferenciadas ou não, e que os aterros sanitários são necessários uma vez que recebem os rejeitos provenientes de outros processos, considera-se que todas as rotas tecnológicas possuem um sistema de coleta e um aterro sanitário, podendo existir outras tecnologias entre estas (FERREIRA e JUCÁ, 2017).

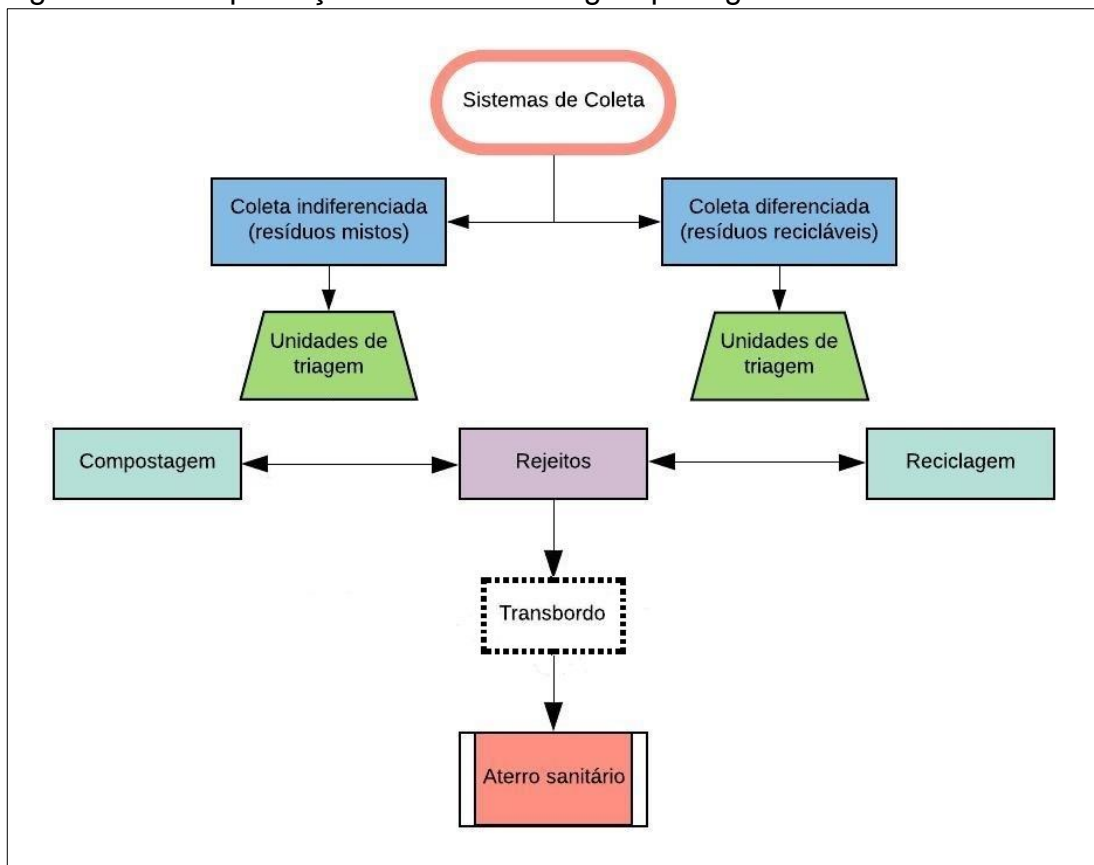
Tendo em vista que as rotas tecnológicas são formadas por um conjunto de tecnologias, com diversas finalidades, estas apresentam potencial para uma solução frente aos problemas acerca do tratamento de resíduos em um ou num conjunto de municípios (LIMA *et al.*, 2014).

Desta forma, é essencial a avaliação do arranjo tecnológico mais adequado para cada localidade, uma vez que dependendo das características e necessidades locais, o conjunto de tecnologias empregado será diferente.

Para seleção das tecnologias a comporem uma rota deve-se considerar o modo de segregação dos resíduos, já que a forma como estes são separados impactam nas escolhas e acabam definindo a rota tecnologia. Cada tecnologia possui uma finalidade e é designado a uma tipologia de resíduo, desta forma dependem, sobretudo, dos materiais a ela destinados. Se a separação ocorre de maneira incorreta, o potencial da tecnologia não é alcançado, o que pode acarretar na inutilização da mesma, que em vez de uma solução torna-se um problema. Assim, é fundamental que as escolhas baseiem-se no modelo de segregação e de coleta da região avaliada.

Na Figura 1 é apresentada uma exemplificação de rota tecnológica aplicada à gestão de resíduos sólidos.

Figura 1 - Exemplificação de rota tecnológica para gestão de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de Jucá *et al.* (2014)

3.5. MODELOS DE APOIO À DECISÃO

Para realização de qualquer planejamento ou na procura de uma solução frente a um problema, decisões devem ser tomadas, mas devido ao grande número

de variáveis envolvidas, riscos e incertezas, o processo decisório pode ser realizado de forma errônea, mesmo sendo este um processo cotidiano, trazendo por muitas vezes mais problemas do que soluções.

O processo decisório envolve etapas de diagnóstico da situação, obtenção de dados, além da necessidade de conhecimento acerca dos diferentes cenários e possibilidades, dependendo essencialmente da habilidade dos decisores para que se obtenha sucesso nas escolhas tomadas (MENDONÇA e VARVAKIS, 2018; PEREIRA *et al.*, 2018).

O processo para tomada de decisão deve ser estruturado e resolvido de modo detalhado e consistente, sendo este complexo, visto que para encontrar soluções que atendam as problemáticas enfrentadas deve-se considerar inúmeras possibilidades e fatores, necessitando a participação de muitas pessoas (SHIMIZU, 2010).

A problemática da tomada de decisão é caracterizada por um grande número de alternativas e critérios, cabendo aos gestores as tarefas de selecionar, ordenar, classificar ou mesmo detalhar, as alternativas tecnológicas disponíveis, considerando múltiplos critérios (LIMA *et al.*, 2014).

A área dos resíduos sólidos envolve muitos processos decisórios nos quais problemas podem ser identificados. Devido a inúmeros fatores como a necessidade da adoção de soluções práticas e rápidas para o gerenciamento dos resíduos gerados, atrelado a muitas vezes ao pouco conhecimento técnico, a tomada de decisão acaba sendo falha, acarretando na adesão de medidas ineficientes, que consideram principalmente a dimensão econômica, que resultam na não resolução dos problemas existentes (MERSONI e REICHERT, 2017).

Existem diferentes tecnologias que podem ser aplicadas e fazer parte do sistema de gestão dos RSU, sendo necessária a consideração de diversos fatores para escolha da melhor opção a ser aplicada.

O processo de análise das alternativas e a escolha de uma única abordagem ou um único arranjo para gestão dos resíduos sólidos, que atenda as demandas existentes e os objetivos dos decisores, é uma tarefa desafiadora, devendo ser realizada com cautela, devido ao grande número de fatores e critérios envolvidos.

Na escolha da melhor configuração de sistema ou das tecnologias escolhidas para compor uma rota tecnológica para os resíduos sólidos de uma região, o processo decisório requer análises quanto às características da região, as

tecnologias consideradas, entre outras informações, necessitando a inclusão de especialistas, que auxiliem na escolha mais adequada.

Coban *et al.* (2018) falam da importância da realização de avaliações considerando a realidade do local, uma vez que um cenário pode ser adequado para o gerenciamento de resíduos para uma determinada cidade, e ineficaz para outra.

Assim, tendo em vista as inúmeras análises que devem ser realizadas, para auxiliar os decisores na busca da melhor alternativa ou estratégia mais adequada para resolução de um determinado problema, ferramentas apropriadas que atendam as necessidades enfrentadas podem ser utilizadas.

Os modelos de apoio à decisão (DSM - *Decision Support Model*) são ferramentas capazes de modelar alternativas que satisfaçam condições pré-estabelecidas, facilitando a comunicação entre as partes interessadas e reduzindo possíveis conflitos, para seleção da melhor alternativa, com a utilização de uma técnica de otimização rápida e eficaz, abrangendo e avaliando diversos critérios e alternativas através de variados métodos, servindo como suporte para decisões mais eficazes e abrangentes (SOLTANI, 2014; COBAN *et al.*, 2018).

Resumidamente, os modelos são utilizados para representar de forma simplificada os elementos escolhidos como mais relevantes, para situação avaliada (CORNELLI, 2014).

Conforme Macedo *et al.* (2017), os modelos utilizam diferentes métricas que permitem comparar alternativas em uma dada condição, considerando diferentes aspectos, escalas, profundidades e robustez de informação.

Entre as tantas variáveis que devem ser consideradas no momento da tomada de decisão, estão fatores como as características dos resíduos gerados, infraestruturas já existentes, impactos ambientais, custos de implantação, benefícios econômicos, características regionais, além de requisitos legais e aspectos sociais devem ser analisados (SOLTANI, 2014; MACEDO *et al.*, 2017).

Segundo Dewi *et al.* (2010), os DSMs são divididos principalmente em modelos baseados em custos, em impactos ambientais e em multicritérios, sendo comumente utilizados os primeiros, uma vez que as questões econômicas muitas vezes se sobressaem as demais.

3.5.1. Modelos baseados em análise multicritério

Os modelos de avaliação multicritério (MCDA - Multi-criteria Decision Analysis), possuem como característica principal, a consideração de vários critérios individuais, e por muitas vezes conflitantes, como os aspectos referentes aos três pilares da sustentabilidade, sendo estes, critérios econômicos, sociais e ambientais, de maneira multidimensional, permitindo aos decisores um maior conhecimento acerca de um problema e proporcionando uma análise sob diferentes pontos de vista (MORRISSEYA e BROWNEB, 2004; REICHERT, 2013; GOULART COELHO *et al.*, 2017).

Desta forma, estes modelos mostram-se indicados para aplicação na busca por soluções de problemas que demandem a avaliação de vários critérios, sendo utilizado como suporte a tomada de decisão, mostrando de forma clara os elementos do processo decisório e consequências das ações potenciais (LIMA *et al.*, 2014).

Entre os benefícios e limitações apresentados por esta tipologia de modelos, destaca-se (SHIMIZU, 2010; REICHERT, 2014; FAVRETTO e NOTTAR, 2016):

- Ampla aplicação, simplicidade de operação e produção de resultados confiáveis;
- Possibilidade da realização de uma abordagem sistemática de avaliação de políticas e melhor compreensão do problema;
- Incorporação de uma mescla de informações quantitativas e qualitativas;
- Consideração das preferências de diferentes partes interessadas com objetivos conflitantes;
- Nível maior de flexibilidade quando comparado a outros modelos;
- Apresentação de um conjunto de preferenciais ou uma classificação geral, e não uma “melhor” solução;
- Necessidade de julgamento pessoal e experiência em tomar decisões;
- Atribuição de pesos para cada critério é subjetivo, alterações dos pesos pode acarretar em resultados diferentes.

Quando utilizadas para o gerenciamento de resíduos, os modelos identificados na literatura levam em conta os resíduos já gerados. Fatores que eliminariam materiais que não podem ser reutilizados, reciclados ou não são

biodegradáveis, geralmente não são considerados (MORRISSEYA e BROWNEB, 2004).

Estas ferramentas podem ser utilizadas em diferentes estudos, sendo aplicadas as mais diversas questões e áreas, inclusive para a gestão sustentável dos resíduos, auxiliando os decisores na busca da melhor forma de gerenciar os RSU (DEWI *et al.*, 2010).

3.5.2. Método AHP - Analytic Hierarchy Process

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) permite a comparação entre elementos de decisão, tanto quantitativos como qualitativos, podendo ser utilizado no processo decisório para seleção da alternativa mais adequada entre as pré-selecionadas. Esta ferramenta permite a modelagem de problemas complexos em uma estrutura hierárquica, mostrando as relações entre metas, critérios, subcritérios e alternativas (LIMA, 2012).

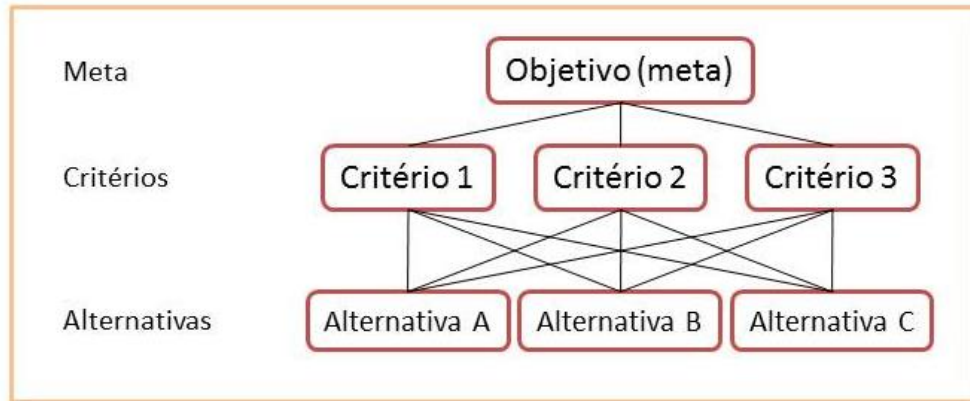
O AHP foi um dos primeiros modelos dedicados ao ambiente decisional multicritério, criado em meados da década de 1970, pelo professor Thomas L. Saaty. Neste, o problema de decisão pode ser decomposto em níveis hierárquicos, representando as preferências dos decisores, facilitando assim sua compreensão e avaliação, simplificando vários objetivos e metas em uma única pontuação, em que a alternativa escolhida é a que ao final possui a maior pontuação (GOMES, 2014; SOLTANI, 2014). Em outras palavras, o método decompõe e sintetiza as relações entre os critérios até que seja obtida a priorização dos seus indicadores, aproximando-se da melhor resposta de medição única de desempenho (LIMA, 2012).

O método utiliza comparações par a par dos critérios e alternativas, avaliando quanto um destes é melhor em comparação ao outro, sendo um reconhecido como mais importante para o processo decisório (AZEREDO *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2011).

A estruturação de um problema AHP pode-se comparar com uma estrutura de árvore, tendo início com a definição de um objetivo global desejado, sendo este a raiz. Após identifica-se as alternativas que serão avaliadas, por meio de critérios pré-determinados como os mais relevantes, como por exemplo, critérios ambientais, sociais, econômicos e técnicos, sendo também determinados subcritérios. A estes

são atribuídos pesos, por meio de pesquisas realizadas com especialistas e interessados (MORRISSEYA e BROWNEB , 2004; SHIMIZU, 1938; SOLTANI 2014). Na Figura 2 exemplifica-se a estrutura do modelo AHP.

Figura 2 - Exemplificação da estrutura do modelo AHP



Fonte: Adaptado de Azeredo *et al.* (2009) e Lima *et al.* (2014)

A cada elemento de um nível cria-se uma matriz de comparações paritárias (MCP), sendo esta preenchida pelo decisor a partir de suas preferências entre cada comparação, com valores definidos (AZEREDO *et al.*, 2009; SHIMIZU, 2010). Estes valores variam de 1 a 9 conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Valores para comparações paritárias

1	Igualmente preferíveis
3	Moderadamente preferível
5	Fortemente preferível
7	Muito fortemente preferível
9	Extremamente preferível
2,4,6,8	Valores intermediários

Fonte: Saaty (1991)

Shimizu (2010) cita como uma das dificuldades apresentadas pelo AHP à quantidade de comparações paritárias necessárias à medida que a complexidade da estrutura de decisão aumenta. Mesmo com limitações, o método AHP atende aos critérios de processo de tomada de decisão, uma vez que separa um problema em subproblemas, agregado a estas soluções, em uma solução geral, facilitando a

tomada de decisão uma vez que permite organizar percepções e julgamentos, além de gerar um resultado numérico e conclusivo (LIMA, 2012).

3.5.3. Aplicações do método AHP

Soltani *et al.* (2014) avaliaram trabalhos que aplicaram técnicas de análise de decisão multicritério para resolução de problemas de gestão municipal de resíduos sólidos. Ao final da análise destes, o referido estudo evidenciou que a abordagem mais utilizada foi referente ao processo de hierarquia analítica (AHP - Analytic Hierarchy Process).

Goulart Coelho *et al.* (2017) também avaliaram diferentes trabalhos em que modelos multicritérios foram utilizados na área de resíduos sólidos. As problemáticas mais usuais encontradas foram às envolvendo a escolha de localização para instalação de tecnologias e estratégias de gestão. No estudo foi constatado que 35% dos 260 artigos avaliados utilizaram o AHP, demonstrando que o modelo é largamente empregado a problemáticas relacionadas ao manejo de resíduos sólidos.

Ainda segundo os autores, a aplicação deste método mostra-se conveniente para análise quanto o gerenciamento dos resíduos, uma vez que atende aos requisitos de avaliação deste tema, visto que os pesos dos critérios são frequentemente definidos pelo julgamento dos pesquisadores, e este oferece uma maneira fácil para atribuição de pesos, conforme a opinião dos interessados, além de realizar a comparação entre pares (GOULART COELHO *et al.*, 2017).

Mirzazadeh *et al.* (2018) utilizam dois MCDA, sendo um deles o modelo AHP, para identificação do critério mais importante a ser considerado para escolha do método e tecnologia de descarte de resíduos mais apropriados para província de Mazandaran, no Irã. Quatro alternativas foram avaliadas, sendo estas; aterros sanitários, compostagem, incineração e reciclagem. Os resultados mostraram que houve discrepância sobre qual seria o critério mais importante na escolha da tecnologia a ser utilizada, mas como resultados de ambos os métodos, a reciclagem foi determinada como a melhor opção para região.

Assim como neste estudo, a reciclagem foi o método que mostrou-se mais adequado entre os sete considerados no trabalho realizado por Marchezetti *et al.* (2011), que teve como objetivo a avaliação da melhor alternativa tecnológica para o tratamento dos RSD na Região Metropolitana de Curitiba, utilizando o modelo AHP.

Babalola (2015) também utilizou o AHP, sendo este aplicado para avaliação das diferentes opções para os resíduos biodegradáveis no Japão. Neste estudo as tecnologias avaliadas foram as de compostagem, digestão anaeróbia, incineração com recuperação de energia, aterro sanitário, além das opções de alimentação animal e processamento de óleo e produtos gordurosos. Aspectos ambientais, socioculturais, políticos, técnicos e econômicos foram considerados e a digestão anaeróbia foi classificada como a mais adequada para a localidade em questão.

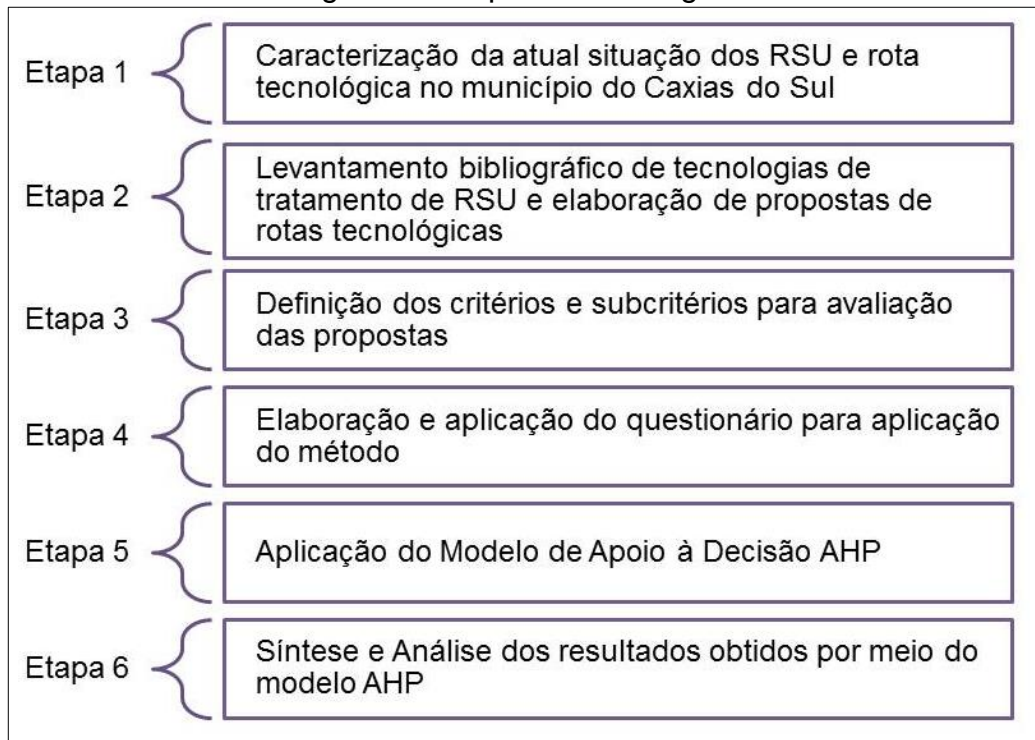
No Brasil, o método AHP, foi empregado em estudo realizado por Lima *et al.* (2014) onde o objetivo foi à proposição de diferentes arranjos tecnológicos a serem aplicados para o tratamento dos RSU, para Região Sul do Brasil. Baseando-se em critérios ambientais, sociais, econômicos e políticos, para soluções ambientalmente adequadas, economicamente sustentadas, socialmente justas e politicamente aceitáveis.

Já Silva *et al.* (2018) aplicaram o AHP juntamente com outro modelo de apoio a decisão, para avaliação da gestão de resíduos sólidos de municípios da Região Norte do Estado do Rio de Janeiro, visando medir o desempenho ambiental dos municípios localizados na área de estudo em questão, no qual foi possível observar que estes estavam aquém dos níveis considerados sustentáveis, principalmente em relação em relação a coleta seletiva de resíduos.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa a metodologia foi dividida em seis etapas, conforme apresentado na Figura 3. Os detalhes sobre cada uma destas são apresentados no transcorrer deste capítulo.

Figura 3 - Etapas metodológicas



Fonte: O autor (2018).

4.1. ETAPAS DE PESQUISA

Os detalhes sobre cada uma das etapas utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa são apresentados a seguir.

4.1.1. Etapa 1 – Rota tecnológica atual

No primeiro momento a partir de informações obtidas junto aos órgãos municipais, determinou-se o cenário atual do gerenciamento dos RSU no município de Caxias do Sul.

As etapas verificadas na atual rota tecnológica foram: coleta, transporte, transbordo, tratamento, destinação e disposição final, sendo os detalhes discutidos na seção 5.1.1.

A partir da obtenção de informações atuais referentes às quantidades de resíduos geradas no município, também foi possível a definição do fluxo de massa em cada uma das etapas do atual sistema.

4.1.2. Etapa 2 – Proposição de novas rotas tecnológicas

A fim de otimizar o cenário existente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre diferentes tecnologias utilizadas para o tratamento dos RSU, que possibilitou a identificação das alternativas mais comumente empregadas. Baseando-se nas pesquisas foram propostos novos arranjos tecnológicos, buscando o melhor aproveitamento dos materiais descartados pela população e a redução das quantidades de resíduos enviadas para disposição final. Os arranjos tecnológicos propostos e os fluxos de massa referentes a cada um destes são apresentados nas seções posteriores.

4.1.3. Etapa 3 – Critérios de avaliação

A partir da definição do objetivo final desejado, sendo neste caso a proposição da rota tecnológica mais adequada para o manejo sustentável dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul por meio da aplicação do método de apoio a decisão AHP, foi necessária a definição de critérios para contribuir com a realização das análises.

Os critérios utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa foram selecionados com base em estudos realizados na área de gerenciamento de resíduos, sendo considerados aspectos importantes para definição de uma alternativa a ser implementada.

Levando em conta a busca pela sustentabilidade, a definição dos critérios foi baseada nos três pilares do desenvolvimento sustentável. Desta forma, foram abordadas as dimensões ambientais, econômicas e sociais.

Através da utilização destes critérios buscou-se avaliar possíveis impactos ambientais, benefícios e incômodos causados, além dos custos envolvidos com a implementação das tecnologias consideradas nas rotas tecnológicas propostas.

Para realização de uma análise mais abrangente e completa, foram também definidos subcritérios, sendo estes referentes a cada um dos três critérios anteriormente definidos, estes apresentados na Figura 4. Os critérios e subcritérios

serão novamente abordados na seção 6.4, na qual estes são descritos com maior detalhamento.

Figura 4 - Critérios e subcritérios

Dimensão ambiental	Dimensão social	Dimensão econômica
<p>Área útil ocupada;</p> <p>Percentual de redução de volume pós-tratamento;</p> <p>Tipo de poluente emitido a atmosfera;</p> <p>Percentual de massa disposta em aterro sanitário;</p> <p>Riscos de contaminação do solo e recursos hídricos.</p>	<p>Aceitação pública;</p> <p>Geração de emprego e renda;</p> <p>Impactos na vizinhança;</p> <p>Qualidade de vida dos trabalhadores (riscos ocupacionais).</p>	<p>Custo total de investimento;</p> <p>Custos com manutenção/operação;</p> <p>Custo unitário por habitante.</p>

Fonte: O autor (2018).

4.1.4. Etapa 4 - Questionário

Para aplicação do método AHP foi necessária realização de avaliações e comparações entre os critérios e as alternativas determinadas, desta forma, foram elaborados e aplicados questionários a diferentes profissionais na área de resíduos sólidos do município para a realização das comparações entre pares.

As comparações foram baseadas nos subcritérios também pré-determinados. Optou-se por não inseri-los no método AHP, pois poderia acarretar na redução do grau de confiabilidade do método. A inclusão destes também iria ocasionar na elaboração de questionários extensos, podendo ter como consequência uma redução no número de respostas ou a obtenção de respostas sem uma verdadeira análise, uma vez que com o passar do tempo o respondente poderia apresentar sinais de cansaço.

Os questionários foram submetidos a 44 profissionais, sendo estes funcionários públicos da Prefeitura de Caxias do Sul, mestrandos do curso de Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade de Caxias do Sul (UCS),

docentes e ex-alunos do curso de Engenharia Ambiental da UCS, técnicos de consultorias ambientais atuantes no município e prestadores autônomos de serviços de consultoria ambiental. Estes, baseando-se em suas percepções e conhecimentos, responderam os questionamentos através da utilização de uma escala de valores descrita na seção 3.5.2.

O questionário em formato Excel, juntamente com um arquivo detalhando as propostas de rotas tecnológicas, os critérios e subcritérios de avaliação, bem como instruções para o preenchimento, foram enviados via correio eletrônico. O tempo médio estimado para a análise das propostas e preenchimento das respostas foi de 25 minutos. O questionário aplicado foi adaptado de Lima (2012) e encontra-se no Apêndice A.

4.1.5. Etapa 5 – Aplicação do método AHP

Para hierarquização das alternativas avaliadas, primeiramente foi realizada a comparação par-a-par dos critérios (ambiental, social e econômico), e posterior comparação destes com as alternativas (Rota 1, Rota 2, Rota 3 e Rota 4), como exemplificado na seção 3.5.2.

A partir do preenchimento do questionário pelos especialistas, os dados foram sistematizados. Optou-se pela utilização da moda, valor utilizado com maior frequência, para inserção no *Software Expert Choice*¹, utilizado para auxiliar no processo de cálculos e hierarquização das alternativas. Esta escolha justifica-se devido ao fato de que em algumas das comparações os valores atribuídos foram muito discrepantes, elevando ou reduzindo a resposta da maioria do grupo de amostragem.

A fim de validar os resultados fornecidos pelo *software*, foram realizados cálculos para aplicação do método AHP por meio de planilhas eletrônicas em Excel, sendo estes descritos na seguir.

No primeiro momento dos dados, referentes aos valores de moda, foram inseridos em uma matriz de comparação, como a exemplificada na Figura 5.

¹ Software de tomada de decisão, utilizado para otimização dos cálculos necessários para aplicação do método AHP. Permite a aplicação dos julgamentos aos objetivos considerados na avaliação, através da comparação entre pares até chegar aos níveis de prioridades (EXPERT CHOICE, 2018).

Figura 5 - Matriz de comparação paritária

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Marins *et. al* (2014).

A diagonal principal da matriz sempre é igual 1 e deve-se atentar para reciprocidade, assim se a_{12} é por exemplo 5, a_{21} será 1/5 (MARCHEZETTI *et. al*, 2011).

Para verificar a consistência dos dados de entrada pode ser aplicado um teste, no qual calcula-se a taxa de consistência (CR). Se o valor encontrado for menor que 0,10 os julgamentos são considerados aceitáveis, caso este seja maior os julgamentos devem ser reconsiderados.

Para calcular a taxa, primeiro é necessária a determinação do vetor dos pesos, encontrado através da multiplicação da prioridade relativa calculada. Esta é obtida através da normalização dos valores, sendo cada elemento contido na matriz dividido pela soma total de sua coluna. Após, calcula-se o valor médio de cada linha, onde estes representam as prioridades relativas.

Estas por sua vez são multiplicadas pelos valores, de cada coluna, inicialmente inseridos na matriz de comparação, sendo criada uma nova matriz. O valor encontrado da soma dos elementos de cada linha representa o vetor dos pesos.

O vetor de consistência é calculado a partir da divisão entre os vetores dos pesos pelas prioridades relativas. A média aritmética destes elementos representa o maior autovalor (λ_{max}) utilizado para o cálculo do índice de consistência conforme Equação 1.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Onde:

CI = Índice de consistência;

λ_{max} = maior autovetor;

n = número de critérios.

Finalmente a taxa de consistência é obtida por meio da Equação 2.

$$CR = \frac{CI}{ACI} \quad (2)$$

Onde:

CI = Taxa de consistência;

ACI = Índice consistência referente ao número de comparações paritárias.

O valor de ACI depende do número de critérios de decisão, sendo alguns destes valores apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Valores do índice de consistência em relação ao número de critérios

n	3	4	5	6	7	8
ACI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Fonte: Shimizu (2010).

Ao todo os passos foram reproduzidos quatro vezes, para as comparações entre os critérios e para as comparações referentes a cada um dos critérios em relação as alternativas. As taxas de consistência calculadas apresentaram valores considerados como aceitáveis pelo método.

Por fim, as prioridades das comparações entre as alternativas são multiplicadas pelas prioridades relativas referentes aos critérios, obtendo-se a prioridade composta que classificam as alternativas.

4.1.6. Etapa 6 – Análise dos resultados

Como resultados das comparações entre critérios e alternativas, foi definida uma escala hierárquica das rotas tecnológicas propostas, indo da mais adequada para menos adequada, para o gerenciamento dos RSU de Caxias do Sul. Foi também realizada análises de consistência das prioridades, verificando assim a confiabilidade dos dados inseridos no modelo.

Após estas verificações foi possível a realização da análise referente à rota tecnológica definida como a mais adequada para o gerenciamento dos resíduos urbanos gerados no município. Avaliando se está era mais adequada e sustentável em relação à atualmente existente.

5. ESTUDO DE CASO – MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL

O município de Caxias do Sul possui um sistema organizado de gerenciamento de resíduos sólidos, com coletas que abrangem quase toda a totalidade da área municipal, 100% da área urbana e 90% da rural, conta com diferentes veículos para o transporte de resíduos, possui vínculo com diferentes associações de recicladores, incentivando assim a reciclagem de materiais, e dispõe de aterro sanitário próprio para destinação de resíduos, com tratamento dos líquidos e queima dos gases gerados (CODECA, 2018). Mesmo apresentando um cenário atual satisfatório, o município não faz uso de diferentes tecnologias para o tratamento dos RSU para melhor aproveitamento dos mesmos e redução do envio de resíduos para aterro, buscando o atendimento das metas descritas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012).

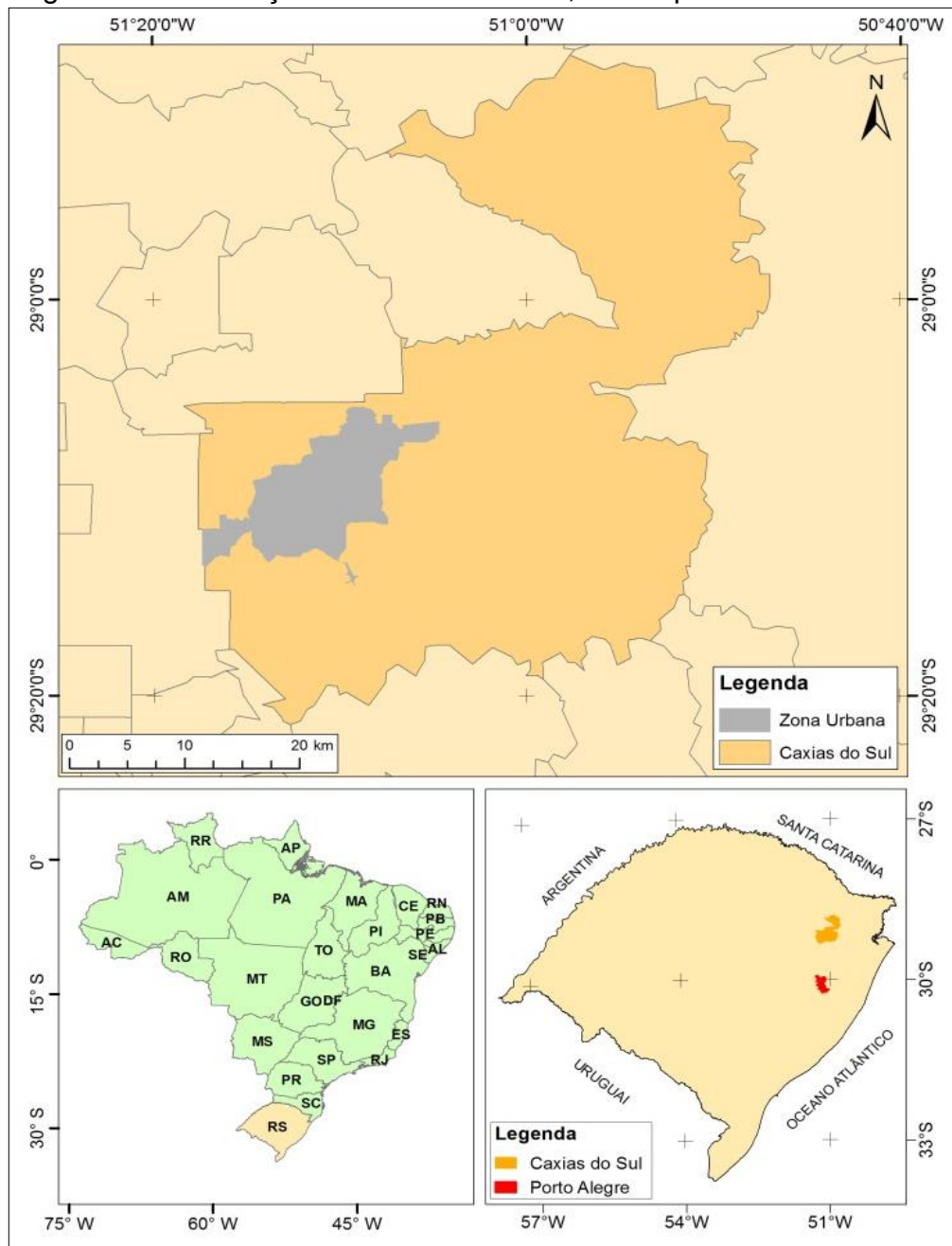
Desta forma, torna-se necessária a avaliação da utilização de diferentes alternativas, para otimização ou realização de mudanças no sistema atual, buscando assim uma rota tecnologia mais sustentável para o gerenciamento dos resíduos, trazendo principalmente benefícios ambientais e sociais.

A seguir são apresentadas informações referentes ao município, à atual rota tecnológica utilizada e funcionamento do sistema, bem como dados sobre as quantidades de resíduos geradas, e determinação e descrição das alternativas, critérios e subcritérios utilizados para a avaliação da rota tecnológica mais adequada para o gerenciamento dos RSU no município de Caxias do Sul, utilizando o método AHP.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Caxias do sul, localizado a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, conforme pode ser visualizado na Figura 6, ocupa uma área territorial de aproximadamente 1.652,308 km², e possui uma população estimada de 483.377 habitantes, sendo que cerca de 96,3% da população vive em área urbana e 3,7% em área rural (IBGE, 2016, 2017, SIMECS, 2017).

Figura 6 - Localização da área de estudo, Município de Caxias do Sul



Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE (2016).

Caxias do Sul é considerada a principal cidade do interior devido a questões acerca de serviços, saúde e educação técnica e superior, sendo uma referência regional (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAXIAS DO SUL, 2018). Possui sua economia principalmente baseada em três grandes seguimentos, sendo estes a indústria, os serviços e o comércio, tendo suas atividades concentradas 53,4%, 29,6% e 17% respectivamente. Destaca-se o grande número de indústrias metalúrgicas localizadas no município (SIMECS, 2017).

Quanto a questões relacionadas à economia, segundo informações disponibilizadas pela Fundação de Economia e Estatística (FEE), no ano de 2015 o município ocupava a segunda posição na lista de municípios com maior Produto Interno Bruto (PIB) no Rio Grande do Sul, com cerca de 20 bilhões de reais.

O índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) leva em consideração dimensões relacionadas à renda, educação e longevidade. A faixa de valores do índice é de 0 a 1, onde 0 representa nenhum desenvolvimento, enquanto o valor igual a 1 representa total desenvolvimento. Na última avaliação realizada no ano de 2010, Caxias do Sul possuía um IDHM de 0,782, estando na faixa de desenvolvimento humano alto (ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL, 2010).

Considerando as características do município, principalmente o crescimento populacional e expansão da área urbana, espera-se que também ocorra um aumento no volume de resíduos gerados, tornando-se necessário a realização de avaliações acerca de alternativas para o tratamento dos resíduos, buscando realizar o gerenciamento correto destes, beneficiando toda a população.

5.1.1. Descrição do cenário atual

No que se refere aos resíduos gerados no município, os serviços de coleta e transporte são realizados pela Companhia de Desenvolvimento de Caxias do Sul (CODECA), sociedade anônima de economia mista, contratada pela prefeitura municipal, que detém atribuição legal para realização destes e de outros serviços como limpeza urbana e operação do aterro sanitário municipal (CODECA, 2018).

Segundo informações disponibilizadas pela CODECA (2018), atualmente, cerca de 360 toneladas de resíduos mistos são coletadas e destinadas diariamente para Estação de Transbordo, localizada junto ao antigo aterro sanitário no município, sendo esta gerenciada pela Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SEMMA) e operada pela CODECA.

Conforme a mesma, diariamente também são recolhidas 90 toneladas de resíduos na coleta seletiva, sendo estas destinadas a 13 associações de recicladores conveniadas ao município. Nestes locais os materiais passam por triagem manual, onde ocorre à separação dos recicláveis como, metais, papéis e plásticos para posterior comercialização.

No município o sistema de coleta é realizado de duas maneiras, do tipo porta-a-porta e a containerizada (mecanizada). Na primeira, veículos percorrem as ruas coletando os resíduos de cada domicílio. Já na mecanizada, ocorre à disponibilização de dispositivos coletivos (contêineres) em que os habitantes depositam seus resíduos e para coleta são utilizados caminhões especiais que elevam estes dispositivos para que os resíduos sejam dispostos no compartimento dos caminhões, após os containers são recolocados em seu local.

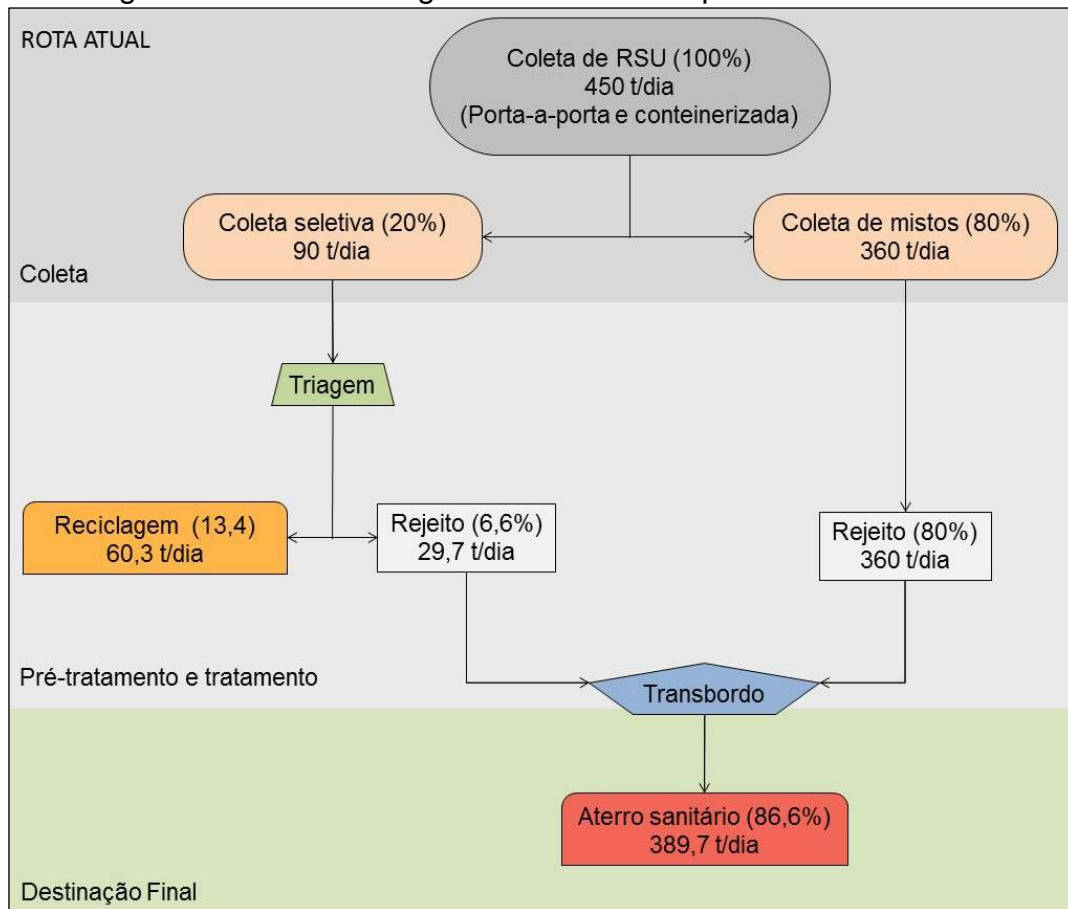
No município também existe um PEV, no qual a população pode depositar resíduos específicos como móveis, pneus e lâmpadas, em locais determinados. Os serviços de coleta abrangem toda a área urbana e cerca de 90% da área rural (CODECA, 2018).

Do montante coletado, 20% (90 t/dia) são referentes à coleta seletiva. Destes, um total de 67% (60,3 t/dia) são encaminhados para reciclagem e 33% (29,7 t/dia) são classificados como rejeito sendo encaminhado para disposição final. Este índice de 33%, que corresponde à fração orgânica e aos rejeitos, foi obtido junto ao estudo realizado por Hammes (2016), no qual este valor refere-se a uma das associações de recicladores do município. Em contato com outras associações os relatos foram semelhantes a este valor, desta forma optou-se por sua utilização. Ressalta-se que em alguns casos os índices são superiores, devido principalmente a utilização de contêineres, onde é comum encontrar muitos materiais misturados.

Considerando a massa total coletada, 86,6% (389,7 t/dia) acaba sendo disposta no aterro sanitário e o percentual de reciclagem atualmente no município é de 13,4% (60,3 t/dia).

A atual rota tecnológica de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul, com a descrição dos fluxos de massa, é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Rota tecnológica atual do Município de Caxias do Sul



Fonte: Elaborado a partir de Hammes (2016) e CODECA (2018).

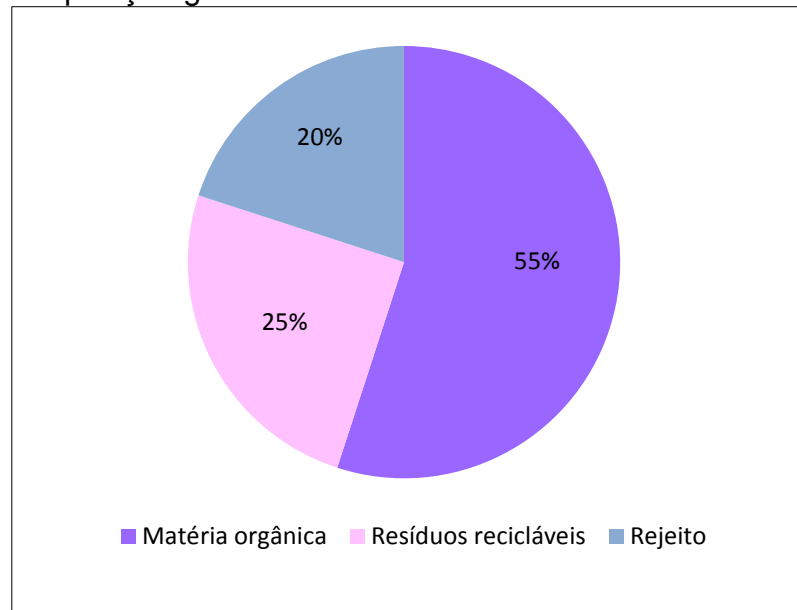
5.1.2. Composição gravimétrica dos RSU de Caxias do Sul

O volume de resíduos gerados pela população de uma localidade depende de fatores como o número de habitantes, poder aquisitivo da população, nível cultural, hábitos e costumes, além da cobertura dos serviços de coleta (REICHERT, 2013). Devido às oportunidades de empregos no município de Caxias do Sul, este concentra uma diversificada população, vinda de diferentes regiões do Brasil e mesmo de fora do país. Com isso, o aumento do número de habitantes refletiu em um acréscimo no volume de RSU gerados.

Para realização de avaliações acerca do gerenciamento de resíduos é fundamental o conhecimento sobre as quantidades e tipologias geradas, buscando determinar qual ou quais seriam as tecnologias mais adequadas para comporem o sistema.

Referente ao montante de 360 toneladas da coleta de resíduos sólidos mistos, a composição gravimétrica é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos da coleta de mistos



Fonte: Elaborado a partir de dados CODECA (2018).

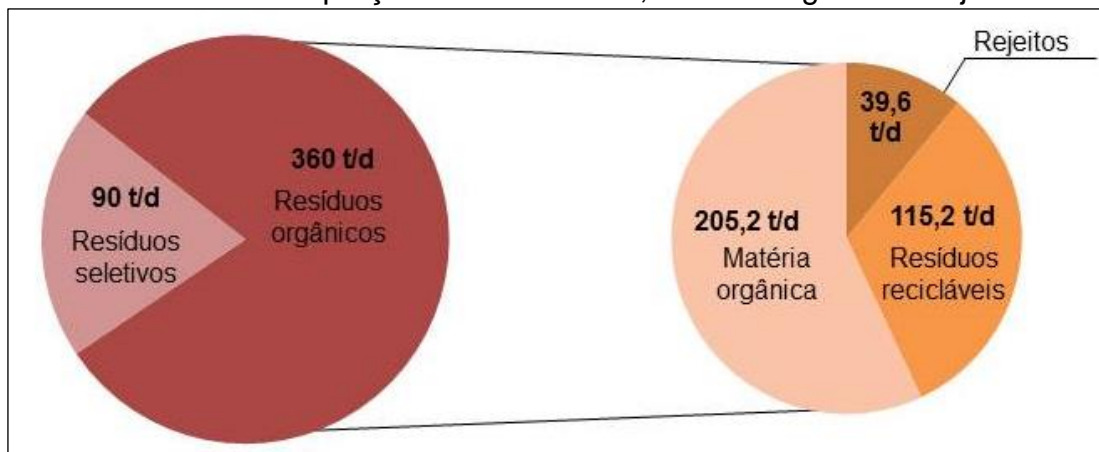
É possível visualizar que a maior porção dos resíduos sólidos é referente à matéria orgânica, com 55% do total, assim mais da metade do montante de resíduos enviado ao aterro municipal são orgânicos. As demais porções representam os resíduos recicláveis (25%), e os rejeitos, com a menor porcentagem, 20%.

Nos anos de 2002, 2003 e 2008 foram realizados diferentes estudos, nos quais as composições dos resíduos da coleta regular (coleta de mistos) de Caxias do Sul foram avaliadas. Schneider *et al.* (2004) avaliaram os RSU gerados em três bairros de classes sociais distintas (alta (A), média (B) e baixa(C)), nos anos de 2002 e 2003, posteriormente no ano de 2008, Schneider e Peresin também realizaram análises da geração de resíduos em bairros de classe A, B e C. No primeiro estudo a média encontrada para os anos avaliados foi de 50,75% de matéria orgânica biodegradável, 28,75% de recicláveis, uma parcela de 0,8% de químicos e 19,7% de rejeitos. Já no estudo de 2008, as médias encontradas foram de 60,4% de biodegradáveis, 21,8% de recicláveis e 17,8% de rejeitos.

Existem também informações acerca da caracterização dos resíduos disponibilizadas no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos sólidos (PMGIRS) do município, publicado em 2016. Os valores informados neste sobre as quantidades de resíduos coletados no município são as mesmas disponibilizadas pela CODECA para os dias atuais.

Segundo o PMGIRS, o volume de resíduos orgânicos coletados é composto por resíduos domiciliares, de limpeza de ruas, de estruturas de drenagem, entulhos, resíduos volumosos, de atividades de podas, além dos originados em serviços públicos de saúde. Na Figura 9 são apresentadas as quantidades em massa de recicláveis, matéria orgânica e rejeitos presentes no montante de resíduos mistos.

Figura 9 - Composição gravimétrica referente à coleta de resíduos sólidos mistos, considerando as porções de recicláveis, matéria orgânica e rejeitos

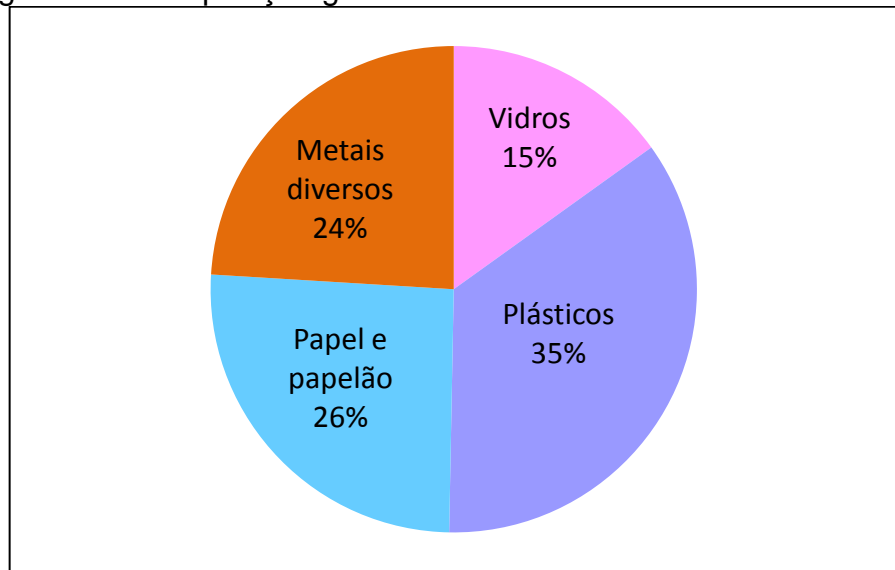


Fonte: Adaptado de PMGIRS (2016).

Comparando os dados mais recentes com os publicados nos trabalhos de 2004 e 2008, constata-se que houve uma queda nas quantidades de rejeitos até o ano de 2016, ocorrendo um aumento em 2018, passando de 11 para 20%. Em relação aos índices de biodegradáveis, estes apresentaram uma tendência de redução nos últimos anos avaliados, já os recicláveis apresentaram oscilações. Se ocorre uma melhora na separação dos resíduos por parte da população, ocorre uma diminuição no índice de recicláveis, uma vez que são destinados corretamente a coleta seletiva.

Quanto a composição dos resíduos da coleta de recicláveis, o PMGIRS traz dados provenientes de quatro associações de triagens conveniadas com o município, desde o ano de 2009 até 2015. As médias dos anos referentes as classificações vidros, plásticos, papel e papelão e metais diversos, são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Composição gravimétrica dos resíduos da coleta seletiva



Fonte: Adaptado de PMGIRS (2016).

No PMGIRS de Caxias do Sul não é informada qual a porcentagem de matéria orgânica e de rejeitos presentes na coleta seletiva. Camardelo e Stedile (2016), constataram em seu estudo, que cerca de 14,57% dos resíduos destinados as três associações avaliadas são referentes a matéria orgânica. Este valor é elevado devido a uma das três coletas realizadas, uma vez que considerando apenas as duas primeiras, este índice cai vai 5,52%. Já os recicláveis apresentam um percentual de 70,95% e os rejeitos 14,48%. Estes valores representam as quantidades recebidas pelas centrais, segundo o mesmo estudo após passarem por processo de triagem, o índice de rejeitos passa para 40,82%. Este aumento pode ser explicado devido ao fato que os recicladores descartam os materiais que não são economicamente atrativos ou considerados sem possibilidade de reutilização ou reciclagem.

Neste trabalho foram aplicados os valores utilizados por Hammes (2016), em que o índice de rejeitos da coleta seletiva foi de 33%, dos quais 4% referem-se à matéria orgânica. Estes acabam sendo enviados para o aterro sanitário municipal sem passar por nenhum tipo de tratamento. Conforme constatado nos estudos e por meio de relatos das próprias associações, muitos materiais não recicláveis acabam sendo destinados a coleta seletiva, contaminando outros materiais e aumentando a quantidade de rejeitos. Este valor de 33% foi utilizado uma vez que se aproxima com os relatos de responsáveis por diferentes associações de recicladores do município.

6. PROPOSTAS DE ROTAS TECNOLÓGICAS E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Para avaliação da rota tecnológica mais adequada para o município de Caxias do Sul, considerando aspectos ambientais, econômicos e sociais, foram elaboradas diferentes propostas, além da definição de critérios para avaliação da melhor opção, sendo ambos apresentados nas seções a seguir.

6.1. ROTAS TECNOLÓGICAS PROPOSTAS

Buscando responder a questão de qual seria a rota tecnológica mais adequada para o tratamento sustentável dos resíduos sólidos de Caxias do Sul, foram propostos diferentes arranjos tecnológicos.

Estes foram elaborados baseando-se em tecnologias de tratamento largamente utilizadas em outros países e já consolidadas.

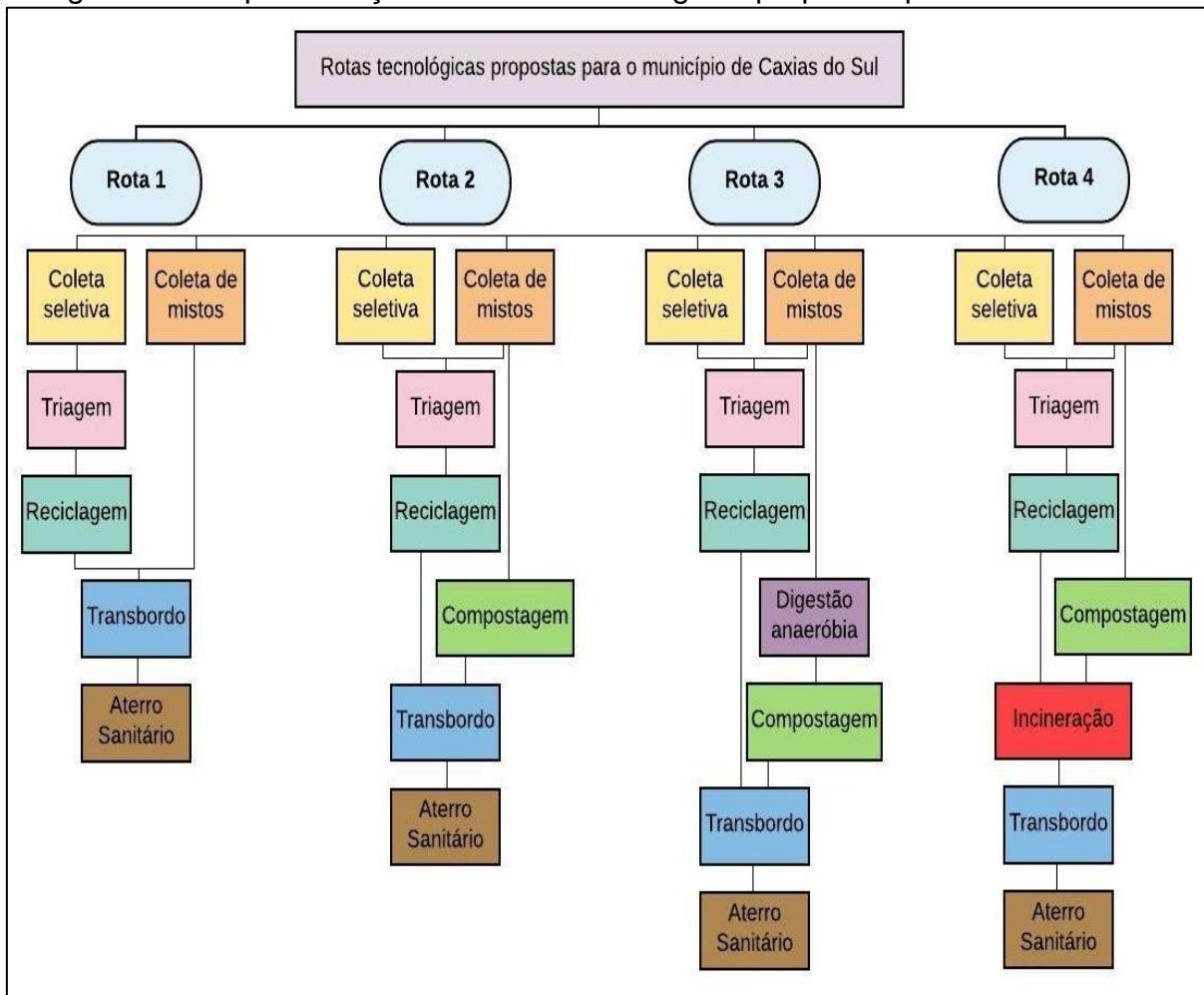
Para construção dos fluxos de massa, apresentados nas próximas seções, utilizou-se como base as metas para 2019, contidas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos para a região Sul do País.

As tecnologias adotadas para o tratamento dos resíduos foram: triagem, reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário. Estes foram escolhidas por serem tecnologias já consolidadas e largamente utilizadas.

Ressalta-se que mesmo com a proposição da utilização de alternativas para o tratamento de resíduos, o aterro sanitário continua compondo a rota tecnológica, uma vez que ainda existe a necessidade de disposição final dos rejeitos provenientes das demais tecnologias.

Na Figura 11 é apresentada uma exemplificação das quatro rotas tecnológicas propostas para o gerenciamento dos resíduos de Caxias do Sul. Estas são compostas por diferentes tipos de coleta, seletiva e de mistos, processos de triagem, reciclagem de materiais, compostagem e digestão anaeróbia das frações orgânicas, incineração de rejeitos, transbordo e aterro sanitário para disposição final.

Figura 11 - Representação das rotas tecnológicas propostas para Caxias do Sul



Fonte: O autor (2018).

No Quadro 3 encontram-se as descrições detalhadas de cada uma das rotas tecnológicas propostas. Estas foram baseadas no trabalho realizado por Mersoni (2015), no qual também foram consideradas tecnologias de tratamento de resíduos já largamente utilizadas e estabelecidas em outros países.

Também foram realizados os fluxos de massas referentes a estas propostas, sendo estes e suas respectivas representações apresentadas nas seções posteriores.

Quadro 3 - Descrição das rotas tecnológicas propostas para Caxias do Sul

Rotas tecnológicas	Descrição do sistema
Rota atual	Dois tipos de coleta, a de resíduos sólidos mistos e a seletiva. Triagem manual e reciclagem dos resíduos da coleta seletiva. Disposição final dos resíduos da coleta de resíduos sólidos mistos e dos rejeitos da triagem em aterro sanitário.
Rota 1	Dois tipos de coleta, a de resíduos sólidos mistos e a seletiva. Mudanças em relação da rota atual como melhoria da separação dos resíduos nas fontes geradores. Otimização do processo de triagem dos resíduos da coleta seletiva (triagem semimecanizada). Reciclagem de resíduos seletivos. Disposição final dos resíduos da coleta de resíduos sólidos mistos e dos rejeitos da triagem em aterro sanitário.
Rota 2	Dois tipos de coleta, a de resíduos sólidos mistos e a seletiva. Melhoria da separação dos resíduos nas fontes geradores. Otimização do processo de triagem dos resíduos da coleta seletiva (triagem semimecanizada). Reciclagem de resíduos seletivos. Triagem dos resíduos da coleta convencional. Compostagem da fração orgânica. Disposição final dos rejeitos em aterro sanitário.
Rota 3	Dois tipos de coleta, a de resíduos sólidos mistos e a seletiva. Melhoria da separação dos resíduos nas fontes geradores. Otimização do processo de triagem dos resíduos da coleta seletiva (triagem semimecanizada). Reciclagem de resíduos seletivos. Triagem dos resíduos da coleta convencional. Digestão anaeróbia da fração orgânica. (Após, o digestato é enviado ao processo de compostagem). Disposição final dos rejeitos em aterro sanitário.
Rota 4	Dois tipos de coleta, a de resíduos sólidos mistos e a seletiva. Melhoria da separação dos resíduos nas fontes geradores. Otimização do processo de triagem dos resíduos da coleta seletiva (triagem semimecanizada). Reciclagem de resíduos seletivos. Triagem dos resíduos da coleta convencional. Compostagem da fração orgânica. Destinação dos rejeitos de ambas as coletas para incineração. Disposição final dos rejeitos do processo de incineração em aterro sanitário.

Fonte: O autor (2018).

6.2. FLUXOS DE MASSA DAS ROTAS TECNOLÓGICAS PROPOSTAS

As entradas e saídas de cada uma das etapas do gerenciamento dos RSU referente às rotas tecnologias propostas para o município de Caxias do Sul são apresentadas a seguir.

6.2.1. Fluxo de massa ROTA 1

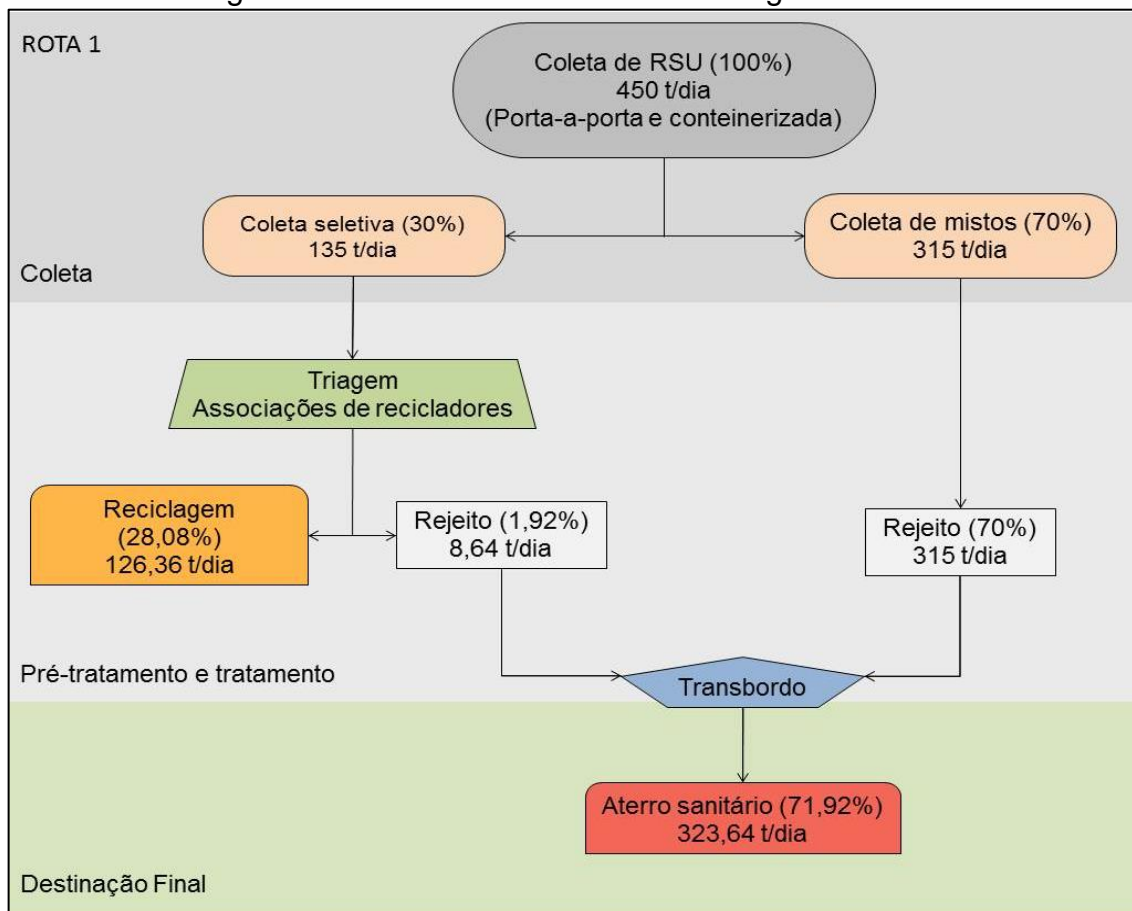
Para primeira proposição de rota tecnológica, nomeada como “ROTA 1”, foi considerada uma melhora da separação nas fontes geradoras e otimização do processo de triagem, aumentando desta forma a quantidade de resíduos seletivos coletados e enviados para reciclagem, bem como reduzindo a quantidade de resíduos destinados ao aterro sanitário.

Primeiramente foi considerada a meta de redução em 50% do material reciclável enviado para aterro sanitário, descrita no Plano Nacional de Resíduos Sólidos para região Sul do Brasil (BRASIL, 2012). Com base na caracterização dos resíduos de Caxias do Sul, atualmente 90 t/dia, que representam 25% da coleta de mistos, é composta por materiais recicláveis. Assim, para atingir a meta, propõe-se que através de uma melhor separação dos resíduos na origem, 45 t/dia de resíduos recicláveis deixem de ser enviados para coleta de mistos e sejam enviados para coleta seletiva.

Na segunda parte da proposta foi considerada a otimização do processo de triagem através da utilização de um sistema semimecanizado, que atualmente é inteiramente manual. Desta forma, baseando-se nos dados de eficiência dos diferentes tipos de processos de triagem utilizados no trabalho de Panizzon (2010), foi assumida uma melhora de eficiência de 10%. Com a otimização da triagem ocorreria uma redução do índice de rejeito e conseqüente aumento na quantidade de materiais destinados a reciclagem, assim, do total de 135 t/dia de resíduos da coleta seletiva, 126,36 t/dia (28,08%) seriam enviados a processos de reciclagem.

O total destinado para disposição final em aterro sanitário nesta proposta é de 323,64 t/dia, 71,92% do montante diariamente coletado no município, conforme pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 1



Fonte: O autor (2018).

6.2.2. Fluxo de massa ROTA 2

Nesta proposta de rota tecnológica, nomeada como “ROTA 2”, continuam sendo consideradas melhorias da separação dos resíduos nas fontes geradoras e otimização do processo de triagem dos resíduos da coleta seletiva. Além destas, propõe-se a triagem dos resíduos da coleta mista, assim como os da coleta seletiva, além da utilização da compostagem para fração orgânica.

Com base na caracterização dos resíduos gerados no município, do total de 315 t/dia da coleta de mistos, que representam 70% do montante coletado, 45 t/dia, cerca de 10%, podem ser encaminhados à reciclagem, enquanto 72 t/dia (16%) seriam classificados como rejeitos sendo destinados a aterro sanitário.

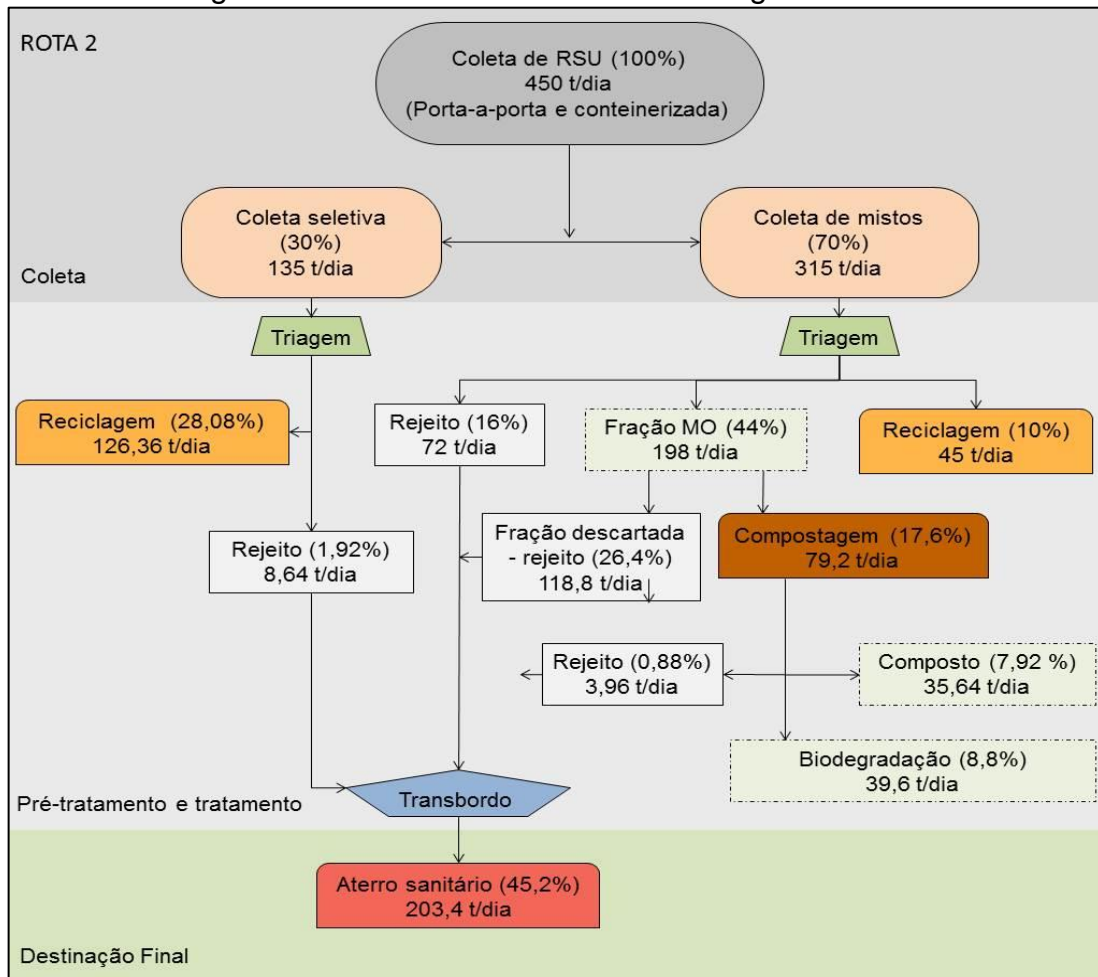
Entre as metas descritas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos está a redução de 40% do percentual de resíduos úmidos dispostos em aterros (BRASIL, 2012). Desta forma, considerando este percentual, das 198 t/dia (44%) que

consistem na fração orgânica dos resíduos da coleta mista, 79,2 t/dia (17,6%) representam a quantidade enviada para compostagem.

O índice de rejeito considerado após a etapa de compostagem foi de 5%, (3,96 t/dia), sendo este valor baseado nos trabalhos realizados por Reichert (2013) e Mersoni (2015). Já a perda de massa adotada foi de 50% (MCDOUGALL *et al.*, 2001), resultando em 35,64 t/dia de composto orgânico.

Assim, ao final, considerando o montante total de resíduos coletados, a quantidade de rejeitos destinados à disposição final em aterro sanitário seria de 45,2%, aproximadamente 203,4 t/dia, conforme pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 2



Fonte: O autor (2018).

6.2.3. Fluxo de massa ROTA 3

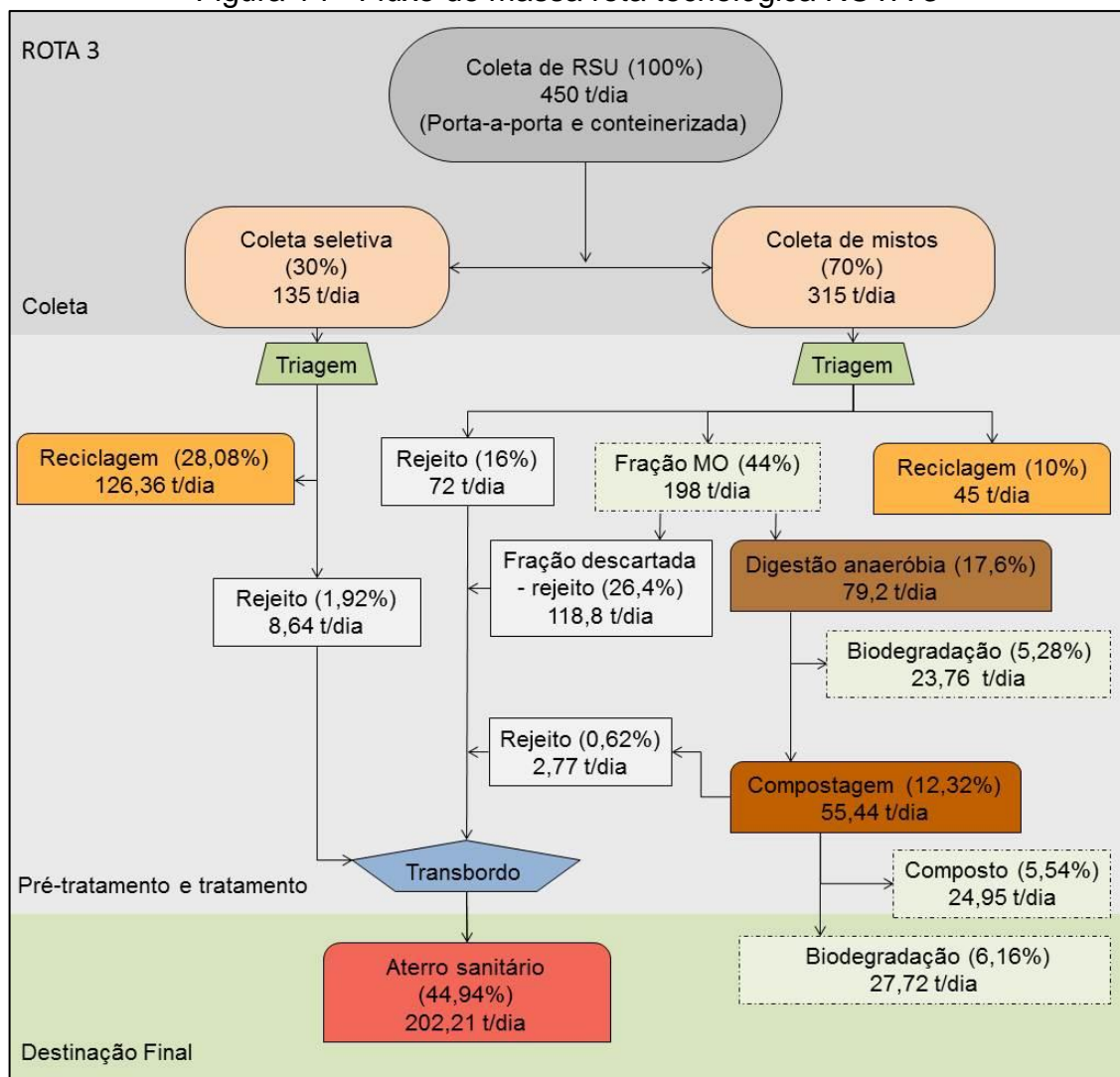
Para esta proposta, nomeada como “ROTA 3” sugere-se o tratamento da fração orgânica dos resíduos por digestão anaeróbia seguida por compostagem.

Desta forma, considerando ainda o percentual de 40% do total de resíduos úmidos da coleta de mistos, as 79,2 t/dia que na proposição anterior eram destinadas a compostagem, são primeiramente enviadas à digestão anaeróbia. Uma vez que resíduos do processo exigem maturação extensiva sob condições aeróbias, nesta proposição a DA é seguida pelo processo de compostagem.

Baseando-se nos trabalhos realizados por Reichert (2013) e Mersoni (2015), após a DA 55,44 t/dia são encaminhadas para compostagem. Os percentuais para esta etapa são os mesmos descritos para a “ROTA 2”.

Conforme pode ser visualizado na Figura 14, ao final, a massa de rejeitos encaminhados à disposição final em aterro sanitário é de 202,21 t/dia, 44,94% do total coletado.

Figura 14 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 3



Fonte: O autor (2018).

6.2.4. Fluxo de massa ROTA 4

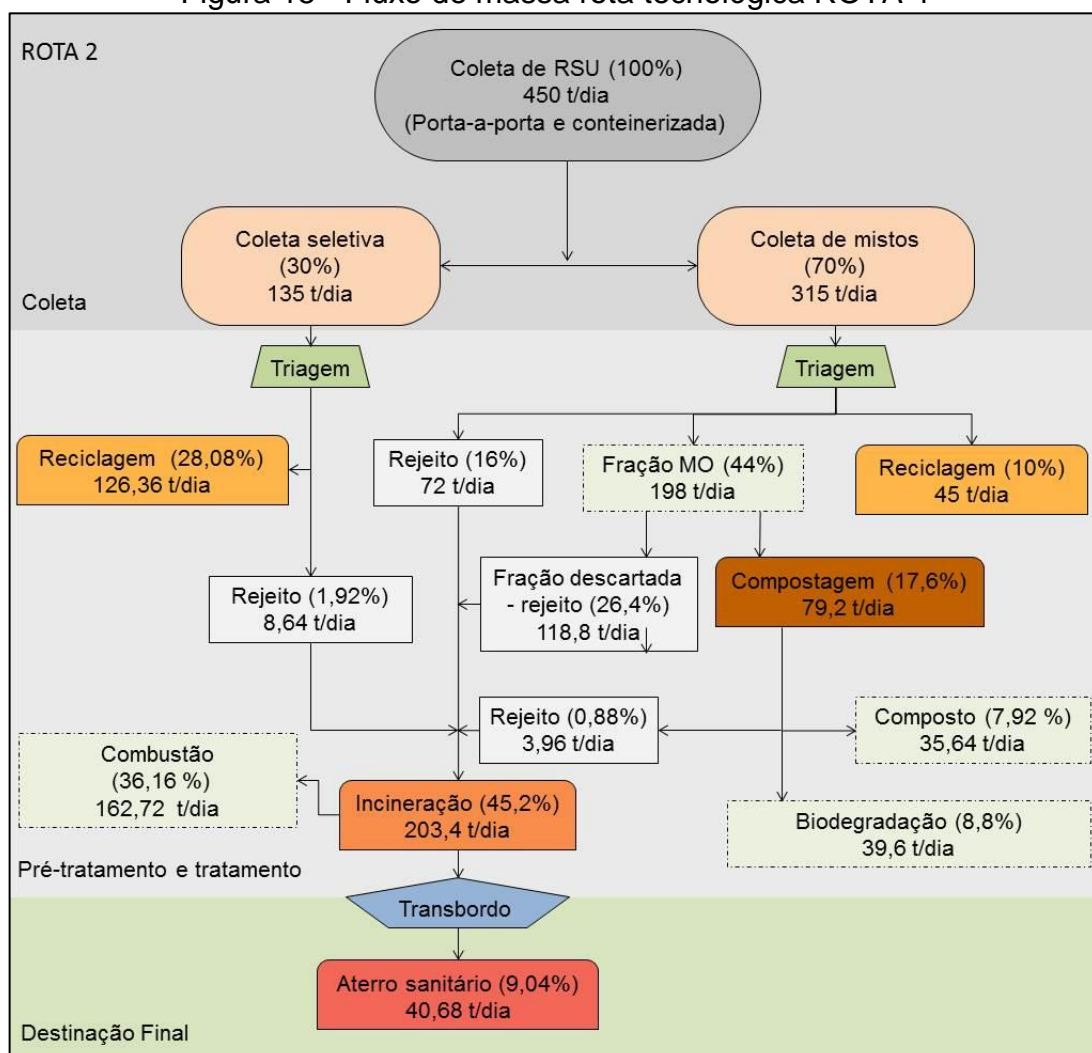
Nesta proposta, denominada como “ROTA 4”, propõe-se a compostagem de parte da fração orgânica e envio dos rejeitos para processo de incineração.

Conforme apresentado na Figura 15, um total de 45,2% (203,4 t/dia) de rejeitos provenientes dos processos de triagem dos resíduos de ambas as coletas e da etapa de compostagem, seriam destinados à incineração.

Segundo McDougall *et al.* (2001) no processo de incineração pode ocorrer uma redução da massa de resíduos entre 70 e 75%, sendo necessário o envio da massa restante para disposição final.

Desta forma, foi considerada a destinação de 40,68 t/dia do total de resíduos coletados no município, sendo estas cinzas e escórias resultantes do processo de incineração, para disposição final em aterro sanitário.

Figura 15 - Fluxo de massa rota tecnológica ROTA 4



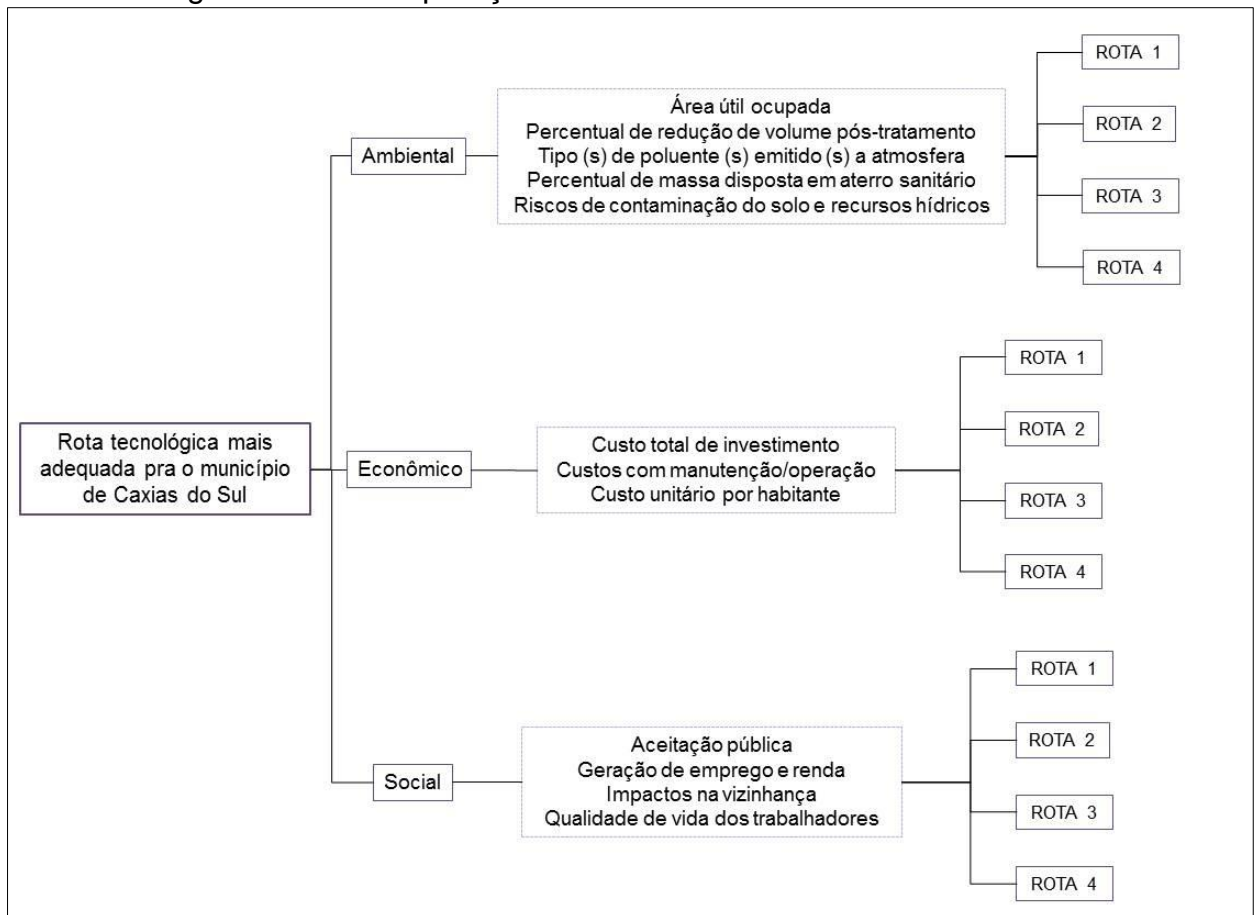
Fonte: O autor (2018).

6.3. HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

Para aplicação do método AHP deve-se estruturar o problema de pesquisa de maneira hierárquica, possibilitando desta forma uma melhor interpretação quanto às relações entre os critérios, subcritérios e alternativas pré-determinados.

Na Figura 16 é apresentada a hierarquia referente ao problema de pesquisa, evidenciando as relações para cada um dos critérios.

Figura 16 - Hierarquização referente aos critérios considerados



Fonte: O autor (2018).

6.4. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Nesta pesquisa para definição dos critérios a serem adotados, foram considerados os três pilares do desenvolvimento sustentável. Desta forma, os fatores utilizados foram: ambiental, social e econômico.

Enquanto o critério ambiental é importante para análise dos possíveis impactos ao meio ambiente, o social é relacionado aos impactos à população, sendo por fim o econômico referente aos custos envolvidos relativos às alternativas.

Baseando-se nos critérios utilizados, 12 subcritérios foram adotados para avaliação da alternativa mais adequada pra o gerenciamento dos resíduos urbanos no município de Caxias do Sul, sendo estes apresentados a seguir.

6.4.1. Dimensão ambiental

Uma vez que o gerenciamento incorreto dos resíduos pode causar impactos negativos ao meio ambiente e a saúde da população, as tecnologias implementadas nesta área devem ser avaliadas com cautela, para que as escolhas não tragam mais problemas do que soluções.

Desta forma, torna-se fundamental a avaliação de aspectos ambientais para a escolha das alternativas de destinação ou tratamento utilizadas para os RSU, sendo analisados os impactos causados na área de implantação, bem como na área de entorno, listando os possíveis riscos oferecidos aos recursos hídricos, ao solo ou a atmosfera.

6.4.1.1. Área útil

Dependendo das tecnologias que compõe uma rota tecnológica para RSU, as áreas necessárias serão diferentes, uma vez que algumas exigem áreas maiores e outras não, por serem mais compactas. Por exemplo, enquanto que aterros sanitários e sistemas de compostagem requerem áreas maiores, plantas de incineração demandam menores áreas (LIMA, 2012, JUCÁ *et al.*, 2014). Sendo desta forma importante a avaliação deste fator na escolha das tecnologias a serem utilizadas no arranjo tecnológico.

6.4.1.2. Percentual de redução de volume pós-tratamento

Estima-se que em processos térmicos como a incineração, o volume de resíduos pode chegar a ser reduzido em 90%, enquanto que em aterros sanitários o percentual de redução gira em torno de apenas 25%.

Desta forma, este subcritério mostra-se importante, visto que ao fim de uma rota tecnologia considera-se sempre a existência um aterro sanitário para os rejeitos, sendo assim, a disposição de grandes volumes podem causar efeitos como redução da vida útil do aterro, demandando novas áreas e conseqüentemente causando impactos ao meio ambiente.

6.4.1.3. Tipo de poluente emitido a atmosfera

Existem muitos processos nos quais ocorre a emissão de poluentes a atmosfera, afetando o meio ambiente e a saúde principalmente da população vizinha e dos trabalhadores, tornando-se necessária a realização de avaliações acerca das quantidades emitidas, bem como do tipo de poluente, uma vez que uns mostram-se mais prejudiciais quando comparados a outros. Mesmo com instrumentos legais estipulando limites de emissão, é importante que este aspecto seja levado em consideração, uma vez que erros de operação podem ocorrer. Ressalta-se também que devido as emissões de poluentes e necessidade de equipamentos, os custos das tecnologias podem ser maiores.

6.4.1.4. Percentual de massa destinada à disposição final pós-tratamento

Entre as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos está à redução dos resíduos dispostos em aterros sanitários. Para região Sul do Brasil existe a meta de redução de 50% do material reciclável que acaba sendo enviado aos aterros. Determina-se que somente rejeitos devem ser destinados a disposição final, tanto os coletados, como os gerados em tecnologias de tratamentos.

Desta forma busca-se prolongar a vida útil dos aterros sanitários, priorizando a não geração, a redução, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e por fim a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos (BRASIL, 2012).

6.4.1.5. Riscos de contaminação do solo e recursos hídricos

As tecnologias de tratamento de resíduos devem ser operadas com cautela, seguindo todas as normas estabelecidas, uma vez que problemas nos sistemas podem ocasionar na contaminação do solo e de recursos hídricos. Por exemplo, os

líquidos gerados nos processos devem ser corretamente coletados e tratados para que não ocorram impactos negativos ao meio ambiente.

6.4.2. Dimensão social

A sociedade como um todo deve ser considerada nas escolhas acerca do gerenciamento dos RSU, uma vez que sofrem os impactos das decisões tomadas.

Desta forma, as tecnologias utilizadas não devem somente levar em conta seu desempenho técnico, mas também devem ser ponderadas as influências destas na sociedade, quais são os benefícios e pontos negativos causados principalmente na vizinhança de entorno, bem como no bem-estar da equipe de trabalho.

6.4.2.1. Aceitação pública

É fundamental a integração da população nos processos de decisão, uma vez que são partes integrantes e importantes na implementação de qualquer sistema. Deste modo, para que se alcance o sucesso, é imprescindível a aceitação das tecnologias por parte da população, para que todos participem com empenho, influenciando positivamente nos resultados.

6.4.2.2. Geração de emprego e renda

A geração de emprego e renda é um fator importante a ser avaliado, visto que traz benefícios a sociedade. Assim, na escolha das tecnologias a serem utilizadas considera-se quais são que podem gerar um maior número de empregos, conseqüentemente auxiliando no sustento de um maior número de famílias.

6.4.2.3. Impactos na vizinhança

Os impactos causados na população que vive nas proximidades dos locais onde as tecnologias serão implantadas devem ser avaliados, sendo encontradas alternativas que causem o menor incômodo possível.

Por exemplo, geração de ruídos e odores, que além de afetarem o meio ambiente, podem causar desconfortos aos habitantes, sendo necessária a avaliação de medidas para redução dos efeitos negativos, ou mesmo considerar a implantação

da tecnologia em áreas mais distantes, menos habitadas, conseqüentemente podendo gerar outros efeitos, visto que as distâncias entre os centros geradores e os sistemas de tratamento serão maiores.

6.4.2.4. Qualidade de vida dos trabalhadores (riscos ocupacionais)

Para o correto funcionamento de qualquer atividade os envolvidos devem estar devidamente integrados e aptos a desenvolver suas funções. Para isso, um fator determinante é o ambiente de trabalho, o qual deve possibilitar condições para o pleno desenvolvimento profissional dos trabalhadores, além propiciar condições de segurança, como a utilização de equipamentos de proteção adequados para execução das tarefas.

6.4.3. Dimensão econômica

Os fatores econômicos são em muitas vezes determinantes para escolha de qualquer alternativa a ser implementada, principalmente por parte da administração pública.

O retorno esperado influencia diretamente no processo de análise de investimento de um projeto, assim, quanto maiores os ganhos futuros, mais atraente na percepção do investidor o projeto se mostrará (LIMA, 2012).

Desta forma, os custos envolvidos devem ser avaliados pra que seja encontrado o melhor custo benefício.

6.4.3.1. Custo total de investimento para implantação da rota tecnológica

Os custos totais para implantação abrangem desde os custos iniciais com a construção das estruturas, até a compra de materiais, maquinários, equipamentos e salários dos trabalhadores envolvidos em cada uma das etapas de implantação das tecnologias que compõe a rota tecnológica.

6.4.3.2. Custos com manutenção/ operação

Para avaliação das tecnologias a serem implantadas para o gerenciamento de resíduos, os custos envolvidos durante sua operação devem ser considerados,

buscando assim verificar quais seriam mais adequadas, uma vez que as questões financeiras são importante para estas análises.

Conforme Lima (2012) alternativas como o uso de aterros sanitários podem acarretar em grandes custos, visto que ocorre um aumento destes durante toda a vida útil dos aterros, e por se tratar de grandes períodos, considera-se que os custos em questão acabam sendo transferidos para gerações futuras.

6.4.3.3. Custo unitário por habitante

Para implementação de uma rota tecnológica, sendo esta composta por diferentes tecnologias utilizadas no gerenciamento dos RSU, é importante a análise dos custos unitários por habitantes, uma vez que dependendo deste número, é possível avaliar se a alternativa é ou não adequada. O número de habitantes a serem atendidos por uma alternativa é determinante para avaliação da viabilidade econômica, visto que os custos arrecadados devem ser suficientes para manter o sistema.

7. RESULTADOS

Para avaliar qual dentre as quatro rotas tecnológicas propostas para o gerenciamento dos resíduos sólidos seria mais adequada para a realidade do município de Caxias do Sul, através da utilização do método Analytic Hierarchy Process (AHP), aplicou-se um questionário, apêndice A, a diferentes profissionais ligados a temática de resíduos.

O contato com os convidados foi estabelecido por meio de mensagens eletrônicas. Ao todo, 44 questionários foram enviados, onde ao final de três semanas, 16 convidados os retornaram com suas contribuições, sendo alcançando desta forma um índice de resposta igual a 36,4%. As respostas individuais fornecidas pelos participantes encontram-se no Apêndice B.

Esta amostra foi composta por profissionais formados nas áreas de Engenharia Ambiental, Civil, Química e Ciências Biológicas. Do total de respondentes, 4 atualmente não trabalham diretamente na área de resíduos sólidos. O tempo de experiência com o tema variou de 4 a 25 anos, obtendo-se uma média de 9,6 anos de conhecimento sobre a temática de resíduos sólidos.

7.1. HIERARQUIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Para representar a opinião da maioria dos especialistas convidados, optou-se pela utilização da moda, sendo desta forma utilizado o valor que por mais vezes se repetiu nas comparações par a par. Foi também avaliada a possibilidade da utilização da média, mas tento em vista que em algumas das comparações os valores atribuídos pelos respondentes foram bastante divergentes, estes valores acabavam por não representar a opinião da maioria, acarretando em índices de inconsistência superiores a 10%, não atendendo a metodologia proposta por Saaty (1991), reduzindo a confiabilidade para aplicação do método.

Os valores que mais se repetiram em cada uma das comparações par a par entre os critérios, obtidas por meio da participação dos especialistas, encontram-se em destaque no Quadro 4.

Quadro 4 - Comparação par a par entre os critérios considerados

Preferência pelo critério da esquerda						Preferência pelo critério da direita				
AMBIENTAL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ECONÔMICO
AMBIENTAL	9	7	5	3	1	3	5	7	9	SOCIAL
ECONÔMICO	9	7	5	3	1	3	5	7	9	SOCIAL

Por meio da aplicação do método AHP pode-se constatar que a dimensão ambiental apresentou o maior peso dentre os três critérios avaliados, conforme pode ser visualizado no Quadro 5.

Quadro 5 - Ordem de preferencia dos critérios de avaliação

Ordenação	Critério	Pesos (%)
1°	Ambiental	60
2° - 3°	Econômico Social	20

A grande maioria dos participantes da pesquisa considerou que a dimensão ambiental é em média 3,35 vezes mais importante para avaliação de uma rota tecnológica para o gerenciamento dos RSU que a dimensão econômica e 2,75 vezes que a social. O peso atribuído a este critério foi de 60%, enquanto os demais ficaram empatados com 20% cada um. O fato de que grande parte dos respondentes possui formação na área ambiental, pode explicar certa preferência a este critério frente aos demais.

Muitas decisões são fortemente baseadas nas questões financeiras, sendo outros fatores deixados em segundo plano ou nem mesmos considerados. Este resultado evidencia que o critério econômico não é sempre determinante no processo decisório, podendo sim ser escolhidas alternativas que necessitam de maiores recursos financeiros, mas que sejam capazes de trazer mais benefícios ambientais ou sociais.

7.2. HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO AMBIENTAL

No Quadro 6 são apresentadas as respostas dadas pelos participantes convidados, que realizaram comparações par a par entre as rotas tecnológicas propostas, considerando a dimensão ambiental e os seguintes subcritérios: Área útil ocupada; Percentual de redução de volume pós-tratamento; Tipo de poluente emitido a atmosfera; Percentual de massa disposta em aterro sanitário; Riscos de contaminação do solo e recursos hídricos.

Quadro 6 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão ambiental

Preferencia pelo critério da esquerda						Preferencia pelo critério da direita				
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 2
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4

O índice de consistência encontrado para estes dados foi de 91%, atendendo o limite estipulado pelo método.

Comparando a Rota 1, que consiste na realização de melhorias em relação ao atual sistema de gerenciamento no município de Caxias do Sul, começando por uma melhoria na separação dos resíduos nas fontes geradoras e utilização de um sistema misto de triagem, observou-se que em relação a dimensão ambiental, esta proposta foi a que menos agradou os participantes.

Metade dos respondentes avaliaram as Rotas 2 e 3 como sendo igualmente preferíveis em relação ao critério ambiental. Em ambas as rotas foi considerada a triagem dos resíduos mistos, sendo a fração orgânica enviada respectivamente para compostagem e para digestão anaeróbia seguida de compostagem.

Em todas as comparações par a par a Rota 4 obteve a maior preferencia dos respondentes, que avaliaram esta como a mais adequada para o gerenciamento dos resíduos sólidos no município de Caxias do Sul, considerando a dimensão

ambiental. Nesta proposta além da utilização da reciclagem de materiais e compostagem da fração orgânica, foi considerado o envio dos rejeitos para incineração, sendo destinado para aterro sanitário menos que 10% do total coletado no município.

No estudo realizado por Marchezetti *et al.* (2011), em que o método AHP foi utilizado para hierarquização de diferentes alternativas tecnológicas para o tratamento dos resíduos sólidos domiciliares da região Metropolitana de Curitiba, a incineração foi a tecnologia considerada como a menos adequada. No realizado por Lima *et al.* (2014), foram considerados dois tipos distintos de incineração, com geração de energia em ciclo combinado (energia elétrica e térmica) e somente com geração de energia. A primeira alternativa foi avaliada como promissora para aplicação em municípios com população superior a 250 mil habitantes, com uma linha de tratamento mínima de 8 t/h e possuam polos industriais para geração de energia.

Com isto evidencia-se que existem muitas controvérsias em relação ao tratamento de resíduos utilizando a incineração, seja devido aos riscos de poluição, aos custos de implantação e operação ou a necessidade de mão de obra qualificada, conforme tratado pelos autores acima citados. Os riscos ambientais como a contaminação atmosférica, atribuídos ao processo de incineração de resíduos podem ser mínimos se o processo for bem operado e as medidas de proteção forem realizadas de forma correta.

Para os participantes desta pesquisa, esta é uma opção a ser considerada para o município de Caxias do Sul. Este resultado pode ser relacionado aos subcritérios definidos, como no caso do percentual de redução de volume pós-tratamento e percentual de massa disposta em aterro sanitário.

Assim como outras alternativas, a incineração dependem dos resíduos destinados a ela, desta forma deve ser considerado princípios básicos como a redução na origem, ou mesmo a adoção de tecnologias precedentes, as quantidades a serem incineradas são reduzidas, devendo ser avaliado com critério sua viabilidade.

Vale destacar que a avaliação considerando a dimensão ambiental foi a que apresentou valores mais discrepantes atribuídos pelos participantes. Enquanto alguns mostravam preferências a uma proposta, outros preferiam a alternativa

contraria. Em alguns casos obteve-se mais que um valor de moda, desta forma, para atender o método, utilizou-se o valor que gerava a menor taxa de inconsistência.

7.3. HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO SOCIAL

Para avaliação das rotas tecnológicas propostas baseando-se na dimensão social, os subcritérios considerados foram: Aceitação pública; Geração de emprego e renda; Impactos na vizinhança e Qualidade de vida dos trabalhadores.

As contribuições fornecidas pelos convidados foram sistematizadas, sendo destacados no Quadro 7 os valores que por mais vezes foram utilizados.

Quadro 7 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão social

Preferencia pelo critério da esquerda						Preferencia pelo critério da direita				
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 2
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4

Para os dados da dimensão social, o índice de consistência calculado foi de 90%, sendo considerados consistentes e aceitáveis.

Observa-se que a Rota 1 foi considerada como a menos adequada para o gerenciamento dos RSU de Caxias do Sul, sendo as demais propostas avaliadas como moderadamente preferíveis em sua relação.

As Rotas 2 e 3 foram avaliadas pelos participantes como igualmente preferíveis, sendo considerado que baseando-se nos subcritérios referentes a dimensão social, nenhuma destaca-se como mais adequada quando comparadas.

A Rota 4 foi considerada pelos avaliadores como sendo respectivamente, moderadamente preferível e fortemente preferível quando comparada com as Rotas 2 e 3.

Nas quatro alternativas de rotas tecnológicas, foi proposta a utilização da reciclagem dos materiais e processos de triagem semimecanizada, que mesmo com o uso de maquinários depende fundamentalmente de trabalhadores, gerando emprego e renda para uma grande quantidade de colaboradores.

Mesmo projetados visando causar o mínimo de possíveis impactos ao meio ambiente e a população, os aterros sanitários podem gerar incômodos à vizinhança, devido, por exemplo, a presença de odores desagradáveis e poluição visual, fatores que podem reduzir a aceitação pública. Assim, aterros que recebem menores quantidades e tipologias de resíduos tornam-se opções mais atrativas.

7.4. HIERARQUIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO À DIMENSÃO ECONÔMICA

Considerando a dimensão econômica, os subcritérios de avaliação foram: Custo total de investimento; Custo com manutenção/operação e Custo unitário por habitante. No Quadro 8 em destaque apresenta-se a moda obtida através da sistematização das respostas fornecidas pelos participantes da pesquisa.

Quadro 8 - Comparação par a par entre as rotas tecnológicas propostas considerando a dimensão econômica

Preferencia pelo critério da esquerda						Preferencia pelo critério da direita				
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 2
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 1	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 3
ROTA 2	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4
ROTA 3	9	7	5	3	1	3	5	7	9	ROTA 4

Estes dados foram considerados consistentes e aceitáveis, uma vez que o índice de consistência calculado foi de 91%.

Considerando o critério econômico, a Rota 1 apresentou-se como a mais adequada, estando a frente das demais propostas avaliadas. Em relação às Rotas 2 e 3, esta foi avaliada respectivamente como moderadamente e fortemente preferível. Já em comparação com a Rota 4, esta foi avaliada pela maioria dos respondentes com sendo muito fortemente preferível. Uma vez que nesta opção propõe-se apenas

mudanças menos impactantes ao sistema, sem a inserção de novas tecnologia, a aplicação de recursos financeiros requerida é conseqüentemente menor.

Na comparação entre as Rota 2 e 3, a primeira foi avaliada como moderadamente preferível em relação a segunda, assim como na comparação entre a Rota 2 e 4, podendo este fato ser atribuído a utilização das tecnologias de compostagem, digestão anaeróbia e incineração, que demandam maiores custos de investimento e operação

Por fim, a Rota 4 somente ficou a frente da alternativa 3, que foi considerada a menos adequada em termos de custos. Enquanto em uma é proposta a utilização da digestão anaeróbia seguida de compostagem, propõe-se na outra os tratamentos de compostagem e incineração.

O processo de incineração dos resíduos apresenta custos elevados de instalação e operação, mas devido à possibilidade de geração de energia, estes podem ser amenizados. Outro fator importante desta alternativa é a drástica redução do envio de resíduos para aterro sanitário, que acarretaria em uma redução da necessidade de obtenção de áreas para abertura de novas células que exigem elevados investimentos.

7.5. HIERARQUIZAÇÃO GLOBAL DAS ALTERNATIVAS

Para hierarquização global das alternativas propostas foram utilizadas planilhas eletrônicas em Excel para os cálculos. Os resultados finais são apresentados na Quadro 9.

Quadro 9 - Prioridade das alternativas de rotas tecnológicas

Alternativa	Prioridade (%)
Rota 1	15,90
Rota 2	17,20
Rota 3	13,72
Rota 4	53,19

Observa-se que o peso atribuído a alternativa Rota 4, representa mais da metade do total, bem a frente das demais opções.

Ressalta-se que a incineração é um processo que mostra-se promissor para o município de Caxias do Sul devido a quantidade de resíduos gerados. Sua

implementação em regiões em áreas com menores densidades populacionais pode ser inviável, devido os montantes de resíduos necessários para seu pleno funcionamento (Fernández-González *et al.*, 2017).

A alternativa, Rota 4, contribuiria para que fossem atendidos as determinações feitas pela PNRS (BRASIL, 2010). Uma vez que considera diferentes tecnologias de recuperação e tratamento, sendo destinadas a disposição final somente rejeitos dos processos.

Lima *et al.* (2014), em estudo que utilizou o método AHP para análise de tecnologias para o manejo de RSU, elaborarão quatro propostas de arranjos tecnológicos para a Região Sul do país. O atual cenário de gerenciamento de resíduos de Caxias do Sul, que conta com reciclagem e aterro sanitário sem geração de energia, segundo os autores, é indicado para municípios que possuem uma faixa populacional entre 30 e 250 mil, sendo de porte intermediário e pequeno, que ainda não tenham destinação final adequada. Esta constatação evidencia que devido ao porte e ao montante de materiais descartados diariamente, o município deve avaliar a implementação de alternativas a serem aplicadas ao sistema de gerenciamento, trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos a região.

7.6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO SOFTWARE EXPERT CHOICE

Na Figura 17 é apresentada a hierarquia fornecida pelo *software Expert Choice*, na qual pode ser visualizado o objetivo principal, os critérios de pesquisa e as alternativas de rotas tecnológicas.

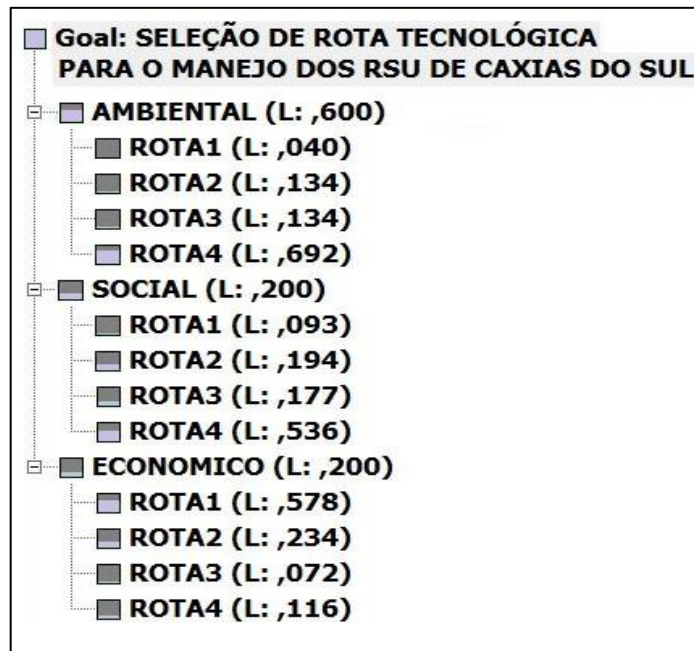
Figura 17 – Hierarquia do problema de decisão



Fonte: *Expert Choice*

A partir das colaborações feitas pelos especialistas, os dados referentes aos valores de moda foram inseridos no *software*. Este por sua vez forneceu como resultado os pesos referentes aos critérios e as alternativas propostas, em que as avaliações foram baseadas em subcritérios pré-determinados já abordados nas seções anteriores. Os pesos podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 18 – Pesos relacionados a cada critério e alternativa de rota tecnológica

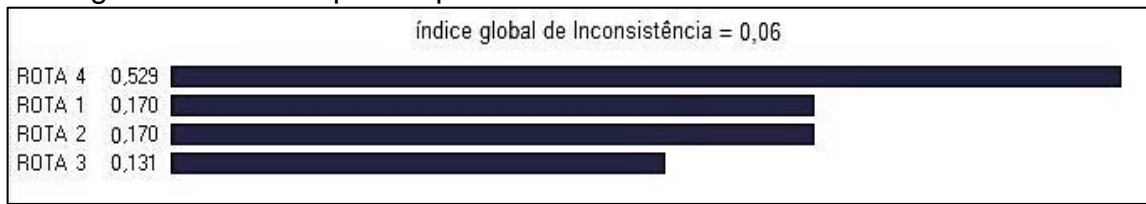


Fonte: *Expert Choice*

A somatória dos pesos é sempre igual a um, conforme a figura. Os pesos atribuídos aos critérios ambiental, social e econômico são os mesmos encontrados através dos cálculos realizados. Já os atribuídos às alternativas são ligeiramente diferentes dos calculados, mesmo assim as hierarquias continuaram as mesmas, podendo este fato ser atribuído aos arredondamentos realizados.

Na Figura 19 apresenta-se a ordem de prioridade das alternativas propostas para o gerenciamento dos resíduos sólidos do município de Caxias do Sul. Juntamente com a priorização, o *software* fornece o índice de inconsistência das avaliações.

Figura 19 – Hierarquia de prioridade e índice de inconsistência de dados



Fonte: Expert Choice

Conforme a metodologia do modelo AHP, este índice deve ser inferior a 0,10. O valor encontrado neste estudo foi de 0,06, obtendo-se desta forma uma consistência de 94%.

Observa-se que em comparação com os dados calculados, assim como em relação aos critérios, os valores atribuídos as alternativas encontram-se ligeiramente diferentes, mas ainda assim a Rota 4 apresenta-se no nível mais alto da hierarquia.

Enquanto que por meio do programa as Rotas 1 e 2 foram classificadas no mesmo nível com pesos iguais, os resultados obtidos através dos cálculos foram diferentes, uma vez que a Rota 2 teve um peso maior em relação a 1.

Conforme estudo desenvolvido por Mersoni e Reichert (2017), rotas tecnológicas contemplam tecnologias de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia e incineração, apresentam melhores desempenhos em relação à dimensão ambiental. Este resultado vai ao encontro do constatado neste estudo, em que a reciclagem, a compostagem e a incineração apresentam vantagens importantes em relação ao meio ambiente.

7.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

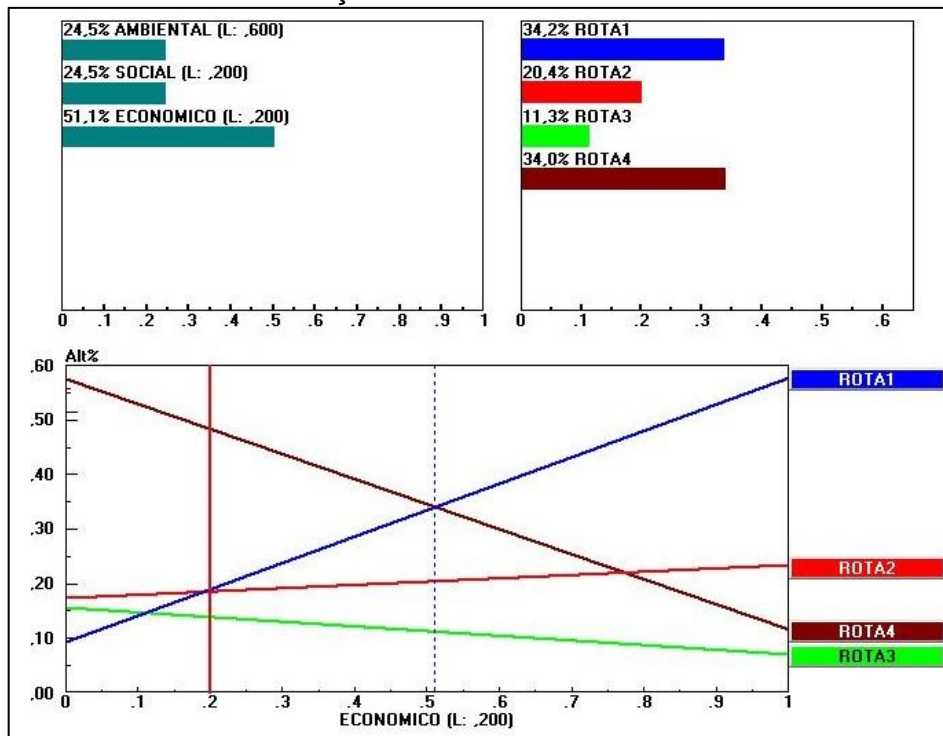
A fim de garantir a consistência dos resultados obtidos, bem como para verificar a estabilidade da hierarquização das alternativas, por meio da interface gráfica do *software Expert Choice* foi realizada uma análise de sensibilidade.

Esta possibilitou a avaliação de diferenças na hierarquia caso possíveis mudanças nos pesos atribuídos aos critérios principais ocorressem. Com a alteração dos pesos foi possível constatar que algumas das variações realizadas influenciaram na ordem de prioridade das alternativas.

Mudanças no cenário justificando em um aumento na preferência pelo critério social, não resultariam em diferenças no resultado final obtido. Já se o

critério econômico fosse considerado mais relevante frente aos demais, constatou-se que a ordem de prioridade seria alterada. Em um cenário onde os critérios ambiental e social fossem igualmente preferíveis, somente se a dimensão econômica representasse mais de 50% do peso a hierarquia sofreria uma alteração, onde a Rota 1 ocuparia a primeira posição e a Rota 4 cairia para segundo lugar, conforme exemplificado na Figura 20.

Figura 20 – Hierarquia de preferência após análise de sensibilidade considerando a variação do critério econômico



Fonte: Expert Choice

É possível concluir que mesmo com alterações drásticas nas prioridades, as Rotas 2 e 3 continuariam sendo consideradas inadequadas para realidade de Caxias do Sul, segundo a análise dos especialistas convidados.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia AHP sugerida neste estudo foi aplicada para seleção de uma rota tecnológica alternativa a atual para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul. No atual cenário a coleta seletiva já é implementada, sendo fonte de emprego e renda, viabilizando o retorno de diversos tipos de materiais ao ciclo produtivo, consequentemente reduzindo o montante de resíduos destinados ao aterro sanitário municipal, além de possibilitar mais facilmente a adoção de outras tecnologias de tratamento.

Reconhecendo que além dos materiais recicláveis outros resíduos apresentam potencial de aproveitamento, fora que ainda uma quantidade muito grande de resíduos acaba sendo disposta em aterro, é imprescindível à consideração da inclusão de diferentes formas de tratamento ao sistema de gestão, sendo interessante que sejam avaliadas novas configurações tecnológicas.

A identificação de tecnologias possíveis para implantação no município de Caxias do Sul possibilitou a elaboração de propostas de rotas tecnológicas para o gerenciamento de resíduos nesta região, buscando atender os preceitos legais, além de evidenciar benefícios que poderiam ser alcançados por mudanças na atual configuração.

Buscando um cenário mais sustentável para o gerenciamento de resíduos, nas avaliações foram consideradas as dimensões ambiental, social e econômica, e subcritérios ligados a estes. Acredita-se que todos são relevantes para o processo decisório, uma vez que evidenciam as vantagens e desvantagens apresentadas por cada alternativa tecnológica.

A metodologia multicritério é uma ferramenta capaz de auxiliar no processo de decisão, uma vez que permite que sejam englobados distintos fatores de avaliação, e possibilita a integração da opinião de interessados e especialistas para tomada de decisão.

A rota tecnológica selecionada como preferível por meio da aplicação do método AHP foi a alternativa de número 4, composta por tecnologias de reciclagem, compostagem, incineração e disposição final de rejeitos em aterro sanitário. Esta possibilita a comercialização de materiais recicláveis de valor econômico, composto orgânico e mesmo de energia se esta for considerada. A escolha desta alternativa é explicada também por apresentar outros benefícios como a geração de novos

empregos que exigem diferentes níveis de capacitação, e a minimização dos impactos ambientais gerados.

Inúmeros trabalhos avaliam as tecnologias de tratamento de resíduos de forma individual, não de forma integrada como nesta pesquisa. Quando avaliadas separadamente podem se mostrar como inadequadas para sua aplicação no gerenciamento dos RSU, mas ao avaliar a tecnologia como parte integrante de um conjunto, esta pode se apresentar como uma excelente alternativa, sanando as demandas da região avaliada.

Pode-se concluir ainda que mesmo considerado muitas vezes como o principal fator para implantação ou não de uma tecnologia, o critério econômico pode não ser determinante, uma vez que os custos investidos podem ser minimizados através da comercialização dos subprodutos gerados.

A fim de verificar o quão sensível a modificações a alternativa selecionada como preferível poderia ser, realizou-se uma análise de sensibilidade, em que alterações foram feitas nos pesos atribuídos aos critérios de avaliação.

Por meio desta, pode-se perceber que ao realizar uma simulação em que o peso do critério econômico fosse maior que os demais, uma mudança na hierarquia ocorreria e a Rota 1, em que se propõe melhorias da separação na origem e no processo de triagem, sem a inserção de novas tecnologias, passaria a ocupar a primeira posição, tornando-se a preferível.

Tendo em vista que para a implantação de uma rota tecnológica a dimensão econômica é um fator muito importante, é fundamental sua consideração. A curto prazo a implantação da Rota 1 poderia ser considerada, uma vez que apresenta melhorias significativas e menos impactantes frente ao atual cenário, mas avaliando os benefícios ambientais e sociais que poderiam ser alcançados, é importante que os resíduos passem por diferentes tipos de tratamento antes de serem enviados diretamente a aterros sanitários.

Ressalta-se que dependendo dos especialistas participantes os resultados podem mostrar-se diferentes, uma vez que cada convidado possui diferentes percepções e experiências, e suas contribuições são baseados do que conhecem e acreditam como sendo o mais adequado.

Através do desenvolvimento desta pesquisa espera-se estimular a realização de outros trabalhos que possuam o intuito de avaliar as melhores

alternativas para o manejo dos RSU, buscando um melhor aproveitamento dos resíduos, trazendo benefícios para o meio ambiente e para população.

A metodologia aplicada é de fácil execução e compreensão, podendo ser utilizada pelos gestores públicos como ferramenta na avaliação de diversos problemas e situações, nas quais se faz necessário a ponderação de múltiplos critérios para escolha da melhor alternativa.

9. LIMITAÇÕES

As maiores dificuldades enfrentadas para elaboração do trabalho foram relacionadas principalmente a participação dos especialistas. O primeiro fato é que devido ao tempo reduzido, não foi possível a participação destes na elaboração dos cenários, sendo estes baseados em estudos semelhantes realizados para outras regiões do Brasil.

Outro fato importante é que devido ser um trabalho realizado para conclusão no curso de engenharia ambiental, naturalmente, grande parte dos convidados tem relação direta com esta área. Mesmo buscando a participação de gestores ligados a outras áreas, a amostra foi predominantemente representada por profissionais relacionados à temática ambiental.

A metodologia seguida neste estudo dependeu fundamentalmente das respostas fornecidas pelos participantes que determinaram o resultado final, dependendo da opinião individual e dos conhecimentos e experiência adquiridas na área de resíduos sólidos. Dependendo da amostra os valores atribuídos podem ser muito diferentes, já que especialistas de áreas distintas relacionadas ao gerenciamento dos RSU, possuem diferentes percepções e entendimentos. Assim, é possível que se o mesmo questionário fosse aplicado a outros especialistas o resultado obtido fosse diferente.

O percentual de respostas obtidas foi de apenas 36,4%, o que pode ser explicado pela extensão do questionário, que pode ter contribuído na redução da participação dos atores. Mesmo com a disponibilização de contato com o intuito de sanar as dúvidas de preenchimento, a falta de entendimento quanto à forma de preenchimento do questionário é outro fator que pode ter colaborado para a redução do número de respostas, visto que foram recebidos questionários preenchidos de forma errada.

Em alguns casos foi solicitado um novo preenchimento dos questionários, uma vez que constatou-se discrepâncias elevadas entre as respostas fornecidas, resultando na redução da consistência do método, sendo necessária uma reavaliação das contribuições. Por meio de novo contato com os participantes, foi possível verificar que estas grandes diferenças nas respostas foram por falta de atenção ou interpretações errôneas. O número de alternativas propostas também foi reduzido para não acarretar em uma diminuição ainda maior de participação.

10. RECOMENDAÇÕES

Sugere-se que em trabalhos futuros sejam consideradas mudanças nos cenários propostos, como a avaliação da viabilidade da implantação de outras formas de coleta, como a seletiva de resíduos orgânicos. As modalidades de coleta além de definirem a rota tecnológica, definem o funcionamento das tecnologias, tendo em vista que cada uma destas é designada a uma tipologia de resíduos. Pode ser verificada também a inserção de outras tecnologias de tratamento, como tecnologias mais recentes e menos utilizadas para tratamento dos resíduos.

O fluxo para o gerenciamento dos resíduos definido neste trabalho também pode ser alterado, sendo avaliadas mudanças. Se as tecnologias de tratamento fossem situadas próximas ao aterro sanitário, a localização da área de transbordo sofreria uma alteração, uma vez que esta é necessária quando existem grandes distâncias entre uma tecnologia e outra.

Em virtude do tempo reduzido para o desenvolvimento da pesquisa, que devido a mudanças na metodologia foi ainda menor, entende-se que os critérios avaliados poderiam ter sido melhor definidos, como no caso dos custos por exemplo, em que poderia ter sido feita uma pesquisa mais aprofundada, sendo assumidas faixas de valores, sendo estas informações adicionadas ao trabalho e informadas aos participantes.

Esta mudança na metodologia poderia acarretar em duas consequências contrárias, colaborar com a avaliação ou ser tendenciosa, fazendo com os participantes considerassem apenas o que esta sendo informado não incentivando o mesmo a buscar outras informações ou fontes. Em relação aos custos deve-se ter cuidado com os valores assumidos uma vez que muitos trabalhos utilizam os gastos de outras partes do mundo, podendo estar longe da realidade da região avaliada.

Recomenda-se a utilização de diferentes subcritérios ou mesmo a consideração de um maior número de fatores de avaliação. Isto se aplica também as rotas tecnológicas propostas, podendo ser elaboradas mudanças e novas configurações, bem como a incorporação de diferentes estratégias, como o incentivo para redução da geração de resíduos e a separação dos materiais nas fontes geradoras. Arelado a isto é aconselhado o detalhamento de estratégias sugeridas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13463**: Coleta de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 12980**: Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 13591**: Compostagem. Rio de Janeiro, 1996.

BARBOSA, Rildo Pereira. **Resíduos sólidos**: impactos, manejo e gestão ambiental. São Paulo Erica 2014 1. ed recurso online ISBN 9788536521749.

_____. **NBR 11175**: Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL: Caxias do Sul, RS. 2010. Disponível em: <http://atlasbrasil.org.br/2013/pt/perfil_m/caxias-do-sul_rs>. Acesso em: 18 mai. 2018.

AZEREDO, J. S.; PAULA JUNIOR, G. G.; SANTOS, R. B. O.; BARRETO, D. N. S.; GONÇALVES, T. J. M. Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para a seleção de um sistema integrado de gestão (ERP). In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2009, Salvador, BA. **Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2009.

BARBOSA, R. P. **Resíduos sólidos**: impactos, manejo e gestão ambiental. 1 ed. São Paulo: Erica, 2014.

BARSANO, P. R. **Gestão ambiental**. 1 ed. São Paulo: Erica, 2014.

BERNARDO, M.; DA SILVA LIMA, R. Comparação entre modalidades de coleta seletiva de materiais recicláveis. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET OURO PRETO, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312198553_Comparacao_entre_modalidades_de_coleta_seletiva_de_materiais_reciclaveis>.

BABALOLA, M. A. A multi-criteria decision analysis of waste treatment options for food and biodegradable waste management in Japan. **Environments**. v. 2, p. 471-488, 2015.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, altera as Leis nos 6.77, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de

fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá providências. In: SENADO FEDERAL. Legislação Republicana Brasileira. Brasília, 2010.

_____. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus afins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>.

_____. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de atividades e condutas lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm>. Acesso em: 07 mai. 2018.

_____. **Lei nº 2.312, de 03 de setembro de 1954**. Institui as Normas Gerais sobre Defesa e Proteção da Saúde. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1950-1959/lei-2312-3-setembro-1954-355129-publicacaooriginal-1-pl.html>>.

_____. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. In: SENADO FEDERAL. Legislação Republicana Brasileira. Brasília, 2010.

_____. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2017**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Coleta seletiva**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/catadores-de-materiais-reciclaveis/reciclagem-e-reaproveitamento>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos**: manual de orientação / Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, Serviço Social do Comércio. -- Brasília, DF: MMA, 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: 2012. 106 p. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657>.

CORNELLI, R. Análise e seleção de alternativas sustentáveis de esgotamento sanitário. 2014. 136. Tese (Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2014.

BRITO, D. O. Análise integrada dos impactos ambientais e riscos ocupacionais na operação de unidades de triagem do Brasil: revisão bibliográfica. 2016. 34. Artigo (Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Curso de especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, 2016.

CAMARDELO, A. M. P.; STEDILE, N. L. R. (Org.). Catadores e catadoras de resíduos: prestadores de serviços fundamentais à conservação do meio ambiente. Caxias do Sul, RS: EDUCS, 2016. 158 p. ISBN 9788570617996.

CAMPOS, L. S.; COSTA, G. B.; GROSSI, M. G. L.; PINTO, H. B. F.; D'AQUI, R.; MUTO, E. Y. Saúde e Segurança nas Centrais de Triagem de Resíduos Sólidos conveniadas com o Município de São Paulo. 2014.

CAXIAS DO SUL. **Lei nº 8183, de 21 de dezembro de 2016**. Institui o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Caxias do Sul e dá outras providências. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/rs/c/caxias-do-sul/lei-ordinaria/2016/819/8183/lei-ordinaria-n-8183-2016-institui-o-plano-municipal-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos-pmgirs-de-caxias-do-sul-e-da-outras-providencias>>. Acesso em: 06 de mar. 2017.

_____. **Lei Orgânica Complementar nº 376, de 22 de dezembro de 2010**. Consolida a Legislação relativa à Política Municipal do Meio Ambiente e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.camaracaxias.rs.gov.br/Leis/LC/LC-00376.pdf>>. Acesso em: 06 de mar. 2017.

_____. Prefeitura Municipal. **Perfil Socioeconômico**. 2018. Disponível em: <<https://caxias.rs.gov.br/servicos/desenvolvimento-economico/perfil-socioeconomico>>.

COBAN, A. ; ERTIS, I. F.; CAVDAROGLU, N. A. Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 159-167, 2018.

COLVERO, D. A. Análise das rotas tecnológicas existentes para os resíduos sólidos urbanos no município da Cidade Ocidental – GO. 2014. 130. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Programa de Pesquisa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, 2014.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE CAXIAS DO SUL – CODECA. Coletas. Disponível em<<http://www.codeca.com.br/>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

CORNELLI, R. Análise e seleção de alternativas sustentáveis de esgotamento sanitário. 2014. 136. Tese (Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2014.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. ver. e ampl. São Paulo: IPT, 200. 370 p.

DE CARVALHO FELICORI, T; MARQUES, E. A. G., SILVA, T. Q., PORTO B. B., BRAVIN, T. C., SANTOS, K. M. C. Identificação de áreas adequadas para a construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem na mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 21, n. 3, p. 547-560, 2016.

DEWI, O. C.; KOERNER, I.; HARJOKO, T. Y. A review on decision support models for regional sustainable waste management. In: **The International Solid Waste Association World Conference**. 2010.

ECOURBIS. Recicla Sampa. Disponível em: <<http://www.ecourbis.com.br/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

EXPERT CHOICE. For Collaborative Decision Making. Expert choice solutions – How our decision process Works. Disponível em: <<https://expertchoice.com/our-decision-making-methodology/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

FAVRETTO, J; NOTTAR, L. A. Utilização da metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na definição de um software acadêmico para uma Instituição de Ensino Superior do Oeste Catarinense. **Sistemas & Gestão**, v. 11, n. 2, 2016.

FERNÁNDEZ-GONZÁLES, J. M., GRINDLAY, A. L., SERRANO-BERNARDO, F., RODRÍGUES-ROJAS, M. I., ZAMORANO, M. Economic and environmental review of waste-to-energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. **Waste Management**, v. 67, p. 360-374, 2017.

FERNANDEZ NASCIMENTO, V.; CHIMINI SOBRAL, A.; RIBEIRO DE ANDRADE, P.; BALBAUD OMETTO, J. P. H. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 4, 2015.

FERREIRA, C. F. A., JUCÁ, J. F. T. Metodologia para avaliação dos consórcios de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais. **Eng Sanit Ambient**, v. 22, p. 513-521, 2017.

FOLADORI, G. Limites do desenvolvimento sustentável. Unicamp, 2001. p. 222.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações técnicas para a operação de usina de triagem e compostagem do lixo**/ Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2005 52p.; il.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. **Pib dos município do Rio Grande do Sul**: municípios industriais foram os mais afetados em ano de crise. 2015. Disponível em: <<https://www.fee.rs.gov.br/indicadores/pib-rs/municipal/destaques/>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

GOMES, L. P.; KOHL, C. A.; SOUZA, C.L. D. L.; REMPEL, N.; MIRANDA, L. A. S.; MORAES, C. A. M. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 449-462, 2015.

GOMES, L. F. A. M. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. 5. São Paulo. Atlas, 2014.

GOULART COELHO, L. M.; LANGE, L. C.; COELHO, H. MG. Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 1, p. 3-28, 2017.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE – SÃO PAULO. **Caderno de Educação Ambiental - Resíduos Sólidos**. 2014. Disponível em: <<http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/cea/2014/11/6-RES%C3%8DDUOS-S%C3%93LIDOS.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2018.

HAMMES, M. Organização dos catadores de resíduos: uma análise a partir de variáveis socioeconômicas e do ambiente de trabalho. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2016.

HUANG, I. B., KEISLER, J., LINKOV, I.. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. **Science of the total environment**, v. 409, n. 19, p. 3578-3594, 2011.

IBRAHIN, F. I. D. **Análise ambiental** : gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes. São Paulo Erica 2015. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades e Estados: Estimativa populacional**. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panorama>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

_____. **Cidades e Estados: Unidade territorial Caxias do Sul**. 2016. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panorama>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

JARA-SAMANIEGO, J.; PÉREZ-MURCIA, M. D.; BUSTAMANTE, M. A.; PÉREZ-ESPINOSA, A.; PAREDES, C.; LÓPEZ, M.; LÓPEZ-LLUCH, D. B.; GAVILANES-TERÁN, I.; MORAL, R. Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production. **Journal of cleaner production**, v. 141, p. 1349-1358, 2017.

JUCÁ, J. F. T. (Coord.). **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboatão dos Guararapes, PE: Grupo de resíduos sólidos - UFPE, 2014. 184 p.

LIMA, J. D.; JUCÁ, J. F. T.; NÓBREGA, C. C.; MARIANO, M. O. D. H.; CARVALHO JUNIOR, F. H.; LIMA, M. T. C. Modelo de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na região Nordeste do Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, v. 6, n. 3, p. 11-28, 2013.

- LIMA, J. D.; JUCÁ, J. F. T.; REICHERT, G. A.; FIRMO, A. L. B. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. **Eng Sanit Ambient**, v. 19, p. 33-42, 2014.
- LIMA, J. D. Modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. 2012. 400 f. Tese (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.
- LIMA, J. D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. João Pessoa: [s.n.], [2000]. 267 p.
- MACEDO, L. S. Procedimento de apoio à tomada de decisão na seleção de rotas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no âmbito de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. In: CONGRESSO ABES/FENASAN, 2017, São Paulo – SP. **Anais...** São Paulo, 2017.
- MANSUR, G. L.; MONTEIRO, J. H. R. P.; BAHIA, S. R. **O que é preciso saber sobre limpeza urbana**. Rio de Janeiro: IBAM, 1991. 126 p.
- MARCHEZETTI, A. L.; KAVISKI, E.; BRAGA, M. C. B. Aplicação do método AHP para a hierarquização das alternativas de tratamento de resíduos sólidos domiciliares. *Ambiente Construído*, v. 11, n. 2, p. 173-187, abri/jun. 2011.
- MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. XLI SBPO 2009 – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 1 a 4 de setembro de 2009. Porto Seguro. Bahia, 2009.
- MCDOUGALL, F. R.; WHITE, P. R.; FRANKE, M.; HINDLE, P. **Integrated solid waste management: a life cycle inventory**. 2. ed. Grã-Bretanha: Blackwell Publishing, 2001. 544 p.
- MELO, V. S. Requisitos para a implantação de uma usina de triagem e compostagem no município de Telêmaco Borba-PR. 2011.
- MENDONÇA, T. C.; VARVAKIS, G. Análise do uso da informação para tomada de decisão gerencial em uma instituição bancária. **Perspectivas em ciências da informação**, v. 23, n. 1, p. 104-119, jan/mar. 2018. Disponível em: <<http://portaldeperiodicos.eci.ufmg.br/index.php/pci/article/view/2417/2059>>.
- MERSONI, C. Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/RS. 2015. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2015.
- MERSONI, C., REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 5, p. 863-875, set/out 2017.

MIRZAZADEH, F. HADINEJAD, F.; ROSHAN, N. A. Investigating utility level of waste disposal methods using multicriteria decision-making techniques (case study: Mazandaran-Iran). **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, p. 505-515, 2018.

MONTEIRO, J. H. P. (Coord.). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Riode Janeiro: IBAM/SEDU, 2001. Disponível em:<<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>.

MORRISSEY, A. J., BROWNE, J. Waste management models and their application to sustainable waste management. **Waste management**, v. 24, p. 297-308, 2004.

NABAVI-PELESARAEI, A.; BAYAT, R.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H. AFRASYABI, H.; CHAU, K. W. Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management-A case study in Tehran Metropolis of Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 427-440, 2017.

NUNES, R.R., SILVA, R.A.P. Transbordo de resíduos sólidos. **Revista Pensar Engenharia**, v.3, n.1, p. 1-18, jan. 2015.

PANIZZON, T. Implantação de um sistema de triagem mecanizada de resíduos sólidos urbanos oriundos da coleta seletiva para o município de Caxias do Sul: Uma alternativa ao sistema atual. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2010.

PEREIRA, R. M. C.; BATISTA, J. F.; ARAÚJO, L. S.; GERHARDT, B. F. Diagnóstico regional como suporte à tomada de decisão sobre itinerários formativos: experiências metodológicas do observatório do IFRO. **Revista Presença Geográfica**, v. 7, n. 2, p. 36-45, 2018. Disponível em: <<http://www.periodicos.unir.br/index.php/RPGeo/article/view/2679/2173>>. Acesso em 9 mai. 2018.

PORTELLA, M. O., RIBEIRO J. C. J. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 4, n. 1, p. 115-134, 2014.

REICHERT, G. A. Apoio à 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. 2013. 276 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2013.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 11.520, de 03 de agosto de 2000**. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/11.520.pdf>>.

_____. **Lei nº 12.037, de 19 de dezembro de 2003.** Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e dá outras providências. Disponível em: <<http://obras.rs.gov.br/upload/arquivos/201706/07235538-lei-estadual-n-12-03703-lei-estadual-de-saneamento.pdf>>.

_____. **Lei nº 14.528, de 16 de abril de 2014.** Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/LEI%2014.528.pdf>>.

_____. **Lei nº 9.921, de 27 de julho de 1993.** Dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos, nos termos do artigo 247, parágrafo 3º, da Constituição do Estado e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/09.921.pdf>>.

SAATY, T. L. Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process. *Bahaviormetrika*, v. 29, p. 1-9, 1991.

SANTOS, J. I. N. Avaliação da operação das unidades de triagem e compostagem instaladas no estado de minas gerais. 2017.

SILVA, A. H. M., SILVA, A. R., ALVARENGA, E., DA HORA, H., ERTHAL, M. Avaliação da gestão de resíduos sólidos urbanos de municípios utilizando multicritério: região norte do Rio de Janeiro. **Braz. J. of Develop.** v. 4, n. 2, p. 410-429, abr./jun. 2018.

SCHNEIDER, V. E., PANAROTTO, C. T., PERESIN, D. Considerações sobre a geração de resíduos em dois municípios do Rio Grande do Sul/Brasil – Representatividade das coletas regular e seletiva. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. 2004.

SCHNEIDER, V. E., PERESIN, D. Geração de resíduos urbanos no município de Caxias do Sul: uma análise da eficiência da segregação em diferentes classes sociais. In: 1º CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE. Bento Gonçalves. 2008.

SCHNEIDER, V. E.; STEDILE, N. L. R. (Org.). Resíduos de serviços de saúde : um olhar interdisciplinar sobre o fenômeno. Caxias do Sul, RS: EDUCS, 2015. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/ebook_residuos.pdf>. Acesso em: 29 maio 2018.

SHIMIZU, T. Decisão nas organizações. 3. ed., rev. e ampl. São Paulo: Atlas, 2010. 443 p. ISBN 9788522458905.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS METALÚRGICAS, MECÂNICAS E DE MATERIAL ELÉTRICO DE CAXIAS DO SUL – SIMECS. **Perfil Socioeconômico.** 2017. Disponível em: <[file:///C:/Users/User/Downloads/Pefil%20Econ%C3%B4mico%20Caxias%20do%20Sul%202017%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Pefil%20Econ%C3%B4mico%20Caxias%20do%20Sul%202017%20(2).pdf)>. Acesso em: 03 mai. 2018.

SOLTANI, A. HEWAGE, K.; REZA, B. SADIQ, R. Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. **Waste Management**, v. 35, p. 318-328, 2015.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated solid waste management**: engineering principles and management issues. Boston, US: McGraw-Hill, 1993.

WHITE, P. R.; FRANKE, M; HANDLE, P. **Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory**. GAITHERSBURG, MD, 1995.

Apêndice A – QUESTIONÁRIO APLICADO PARA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO AHP

PROJETO DE PESQUISA - UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental

Aluna: Rochele Santos da Conceição **Orientador:** Geraldo Antônio Reichert

Título do trabalho: Uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de uma rota tecnológica aplicada ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Caxias do Sul

Este trabalho tem como objetivo avaliar a rota tecnológica mais adequada para o manejo sustentável dos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Caxias do Sul, através da aplicação do método de apoio à decisão Analytic Hierarchy Process (AHP). Sua participação é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, desta forma solicito que realize as comparações par a par dos critérios e alternativas, presentes neste documento.

Nome:

Profissão:

Formação:

Escolaridade:

Atividade profissional atual:

Instituição que mantém vínculo profissional:

Trabalha direta ou indiretamente com o tema Resíduos Sólidos: Sim Não

Se sim, há quanto tempo?

Comparação entre os critérios
Qual critério você considera mais importante? Atribua o grau de importância.
Realize a comparação par a par entre os três critérios apresentados, seguindo o exemplo abaixo.

Exemplo:

Se na sua percepção o critério AMBIENTAL é 5 (cinco) vezes mais importante que o critério ECONÔMICO, marque o grau de importância da seguinte maneira:
(Critério ambiental à esquerda e critério econômico à direita)

	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
AMBIENTAL			x							ECONÔMICO

Seguindo o exemplo, efetue a escolha do grau de importância entre os critérios.

	Critério da esquerda mais importante				Igual	Critério da direita mais importante				
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
AMBIENTAL										ECONÔMICO
AMBIENTAL										SOCIAL
ECONÔMICO										SOCIAL

Nesta etapa, para as comparações par a par você deve levar em consideração os subcritérios referentes a cada um dos três critérios (ambiental, social e econômico). Estes são descritos no documento enviado junto a este arquivo.

Agora de acordo com o critério **AMBIENTAL**, faça a comparação par a par entre as alternativas.

	Critério da esquerda mais importante				Igual	Critério da direita mais importante				
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
ROTA 1										ROTA 2
ROTA 1										ROTA 3
ROTA 1										ROTA 4
ROTA 2										ROTA 3
ROTA 2										ROTA 4
ROTA 3										ROTA 4

Agora de acordo com o critério **SOCIAL** faça a comparação par a par entre as alternativas.

	Critério da esquerda mais importante				Igual	Critério da direita mais importante				
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
ROTA 1										ROTA 2
ROTA 1										ROTA 3
ROTA 1										ROTA 4
ROTA 2										ROTA 3
ROTA 2										ROTA 4
ROTA 3										ROTA 4

Agora de acordo com o critério **ECONÔMICO** faça a comparação par a par entre as alternativas.

	Critério da esquerda mais importante				Igual	Critério da direita mais importante				
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
ROTA 1										ROTA 2
ROTA 1										ROTA 3
ROTA 1										ROTA 4
ROTA 2										ROTA 3
ROTA 2										ROTA 4
ROTA 3										ROTA 4

Apêndice B – CONTRIBUIÇÕES DOS ESPECIALISTAS CONVIDADOS

Quadro A.B. 1 – Pesos atribuídos as comparações por pares referentes aos critérios de avaliação

Comparação por pares - critérios		N° Participante																Moda
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
AMB	ECO	1	3	5	3	3	3	5	3	-3	1	7	5	5	3	5	3	3
AMB	SOC	7	3	3	1	3	1	3	1	1	3	1	3	5	3	5	1	3
ECO	SOC	1	1	-3	-3	1	3	3	1	-3	-3	5	1	-3	1	3	1	1

Quadro A.B. 2– Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério ambiental)

Comparação por pares – alternativas (critério AMB)		N° Participante																Moda
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
ROTA 1	ROTA 2	-9	-5	-3	-3	-5	-5	-5	-7	-5	-3	-5	-5	-9	-3	-5	1	-5
ROTA 1	ROTA 3	1	-7	-7	-5	-5	-7	-5	-7	-7	-5	-5	-3	-9	-5	-5	-5	-5
ROTA 1	ROTA 4	-9	-9	-9	-5	-7	-9	-3	-7	-9	-9	-7	-7	-9	-5	-9	-5	-9
ROTA 2	ROTA 3	1	-3	-3	-3	1	-3	-3	1	-5	1	1	1	-9	1	1	-7	1
ROTA 2	ROTA 4	-9	-9	-9	-5	-7	-7	-5	-7	-9	-7	-7	-3	-9	-3	-9	-7	-9
ROTA 3	ROTA 4	-9	-9	-9	1	-7	-7	-5	-7	-5	-7	-7	-7	-9	-3	-9	-9	-9

Quadro A.B. 3 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério econômico)

Comparação por pares – alternativas (critério ECO)		N° Participante																Moda
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
ROTA 1	ROTA 2	-9	-5	-3	-3	5	-5	5	5	5	-3	3	3	3	3	3	-5	3
ROTA 1	ROTA 3	-9	-7	-7	-5	5	-3	7	5	-3	-3	5	5	5	5	3	-7	5
ROTA 1	ROTA 4	-9	-9	-7	-7	5	-5	7	7	-3	-7	5	7	9	7	9	-3	7
ROTA 2	ROTA 3	5	5	5	-5	3	3	7	1	-5	1	7	1	3	3	3	-5	3
ROTA 2	ROTA 4	-9	-7	-7	-7	3	-3	7	3	-5	-3	9	3	9	5	7	-5	3
ROTA 3	ROTA 4	-9	-7	-7	-3	1	-3	7	-3	-3	-3	5	-3	7	3	5	-5	-3

Quadro A.B. 4 - Pesos atribuídos as comparações por pares referentes as alternativas (critério social)

Comparação por pares – alternativas (critério SOC)		N° Participante																Moda
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
ROTA 1	ROTA 2	-9	3	3	-3	5	-7	-7	-3	1	-5	-3	-5	-7	-3	3	1	-3
ROTA 1	ROTA 3	-9	-3	-3	-3	9	-7	-7	-5	-3	-7	-3	-7	-5	-3	3	-3	-3
ROTA 1	ROTA 4	-9	-3	-3	-3	9	-3	-7	-7	-3	-7	-7	-3	-3	-5	5	1	-3
ROTA 2	ROTA 3	1	-5	-5	1	7	-3	-3	-3	-3	1	1	1	-3	1	1	-3	1
ROTA 2	ROTA 4	-9	-5	-5	1	7	5	-7	1	-3	1	-7	3	-3	-3	5	-3	-3
ROTA 3	ROTA 4	-9	-5	-5	1	1	3	-7	-3	1	1	-5	3	-3	-3	5	-5	-5

Apêndice C – ARTIGO CIENTÍFICO

USO DO MÉTODO AHP NA TOMADA DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE UMA ROTA TECNOLÓGICA APLICADA AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS

USE OF THE AHP METHOD IN THE MAKING DECISION FOR THE SELECTION OF A TECHNOLOGICAL ROUTE APPLIED TO THE MANAGEMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE OF CAXIAS DO SUL / RS

RESUMO

Com a ampla diversidade de resíduos gerados diariamente, torna-se essencial que se busquem alternativas de tratamento que reduzam os impactos causados devido ao gerenciamento incorreto. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi propor a avaliação de rotas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Caxias do Sul, utilizando o modelo de apoio à decisão Analytic Hierarchy Process (AHP), para hierarquização das alternativas e seleção da mais adequada para o manejo mais sustentável dos resíduos. Quatro arranjos tecnológicos, que integraram processos de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, incineração e disposição final em aterro sanitário, foram apresentadas a especialistas da área de resíduos, que os avaliaram em relação a critérios ambiental, social e econômico, e a subcritérios ligados a estes. As contribuições realizadas foram sistematizadas e inseridas no software Expert Choice, obtendo-se a hierarquização das alternativas propostas. A melhor classificada é composta por reciclagem, compostagem, incineração e aterro sanitário. Esta necessita de maiores investimentos financeiros para implantação, mas apresenta benefícios como a redução da quantidade de resíduos disposta em aterro, arrecadação com a venda de materiais e composto, e geração de emprego e renda. A metodologia multicritério mostrou-se como uma ferramenta de fácil compreensão, capaz de auxiliar no processo decisório, permitindo a consideração de diversos fatores de avaliação e a integração de diferentes opiniões, podendo ser utilizada pelos gestores públicos para as mais diversas situações de análises e conflitos.

Palavras-chave: Gestão de resíduos, Apoio à decisão, Análise multicritério, Analytic hierarchy process (AHP), Tratamento de resíduos.

ABSTRACT

With the large diversity of solid waste generated daily, it is essential that new treatment alternatives be used to minimize the negative impacts caused by incorrect management. In this context, the purpose if this study was proposed an evaluation of technological routes for the management of urban solid waste in the city of Caxias do Sul, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) decision support model to hierarchy of alternatives and selection of the most appropriate for the most sustainable management of waste. Four configurations of technological routes, which integrated processes of recycling. composting, incineration and final disposal in landfill, were proposed and presented to experts in the area of solid waste, who evaluated the purposes linked to the environmental, social and economic criteria and to

sub criteria related to them. The contributions were systematized and inserted in the Expert Choice software, obtaining the hierarchy of the proposals. The best choice classified is composed by recycling, composting, incineration and landfill. This requires greater financial investments for implementation, but presents benefits such as the reduction of the amount of waste disposed in landfill, collection with the sale of materials and compound, generation of employment and income. The multi-criteria methodology proved to be easy to understand, capable of assisting in the decision-making process, allowing the consideration of several evaluation factors and the integration of different opinion, and it is possible to be used by public managers for the most diverse situations of analysis and conflicts.

Key words: Waste management; Decision support; Multi-criteria analysis; Analytic hierarchy process (AHP); Waste treatment.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a industrialização, os atuais padrões de produção de bens descartáveis e os hábitos de consumo da população, são grandes desafios enfrentados nos últimos anos pela sociedade, tendo em vista que a estes está atrelada a intensificação da exploração de recursos naturais disponíveis e a conseqüente geração de grandes quantidades e tipologias de resíduos.

A preocupação com relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos teve início principalmente devido aos riscos a saúde da população, conforme evidenciou-se com a instituição da Lei 2.312 no ano de 1954, que estabeleceu condições de coleta, transporte e destinação final dos resíduos sólidos, de forma que estes não provocassem inconvenientes a saúde e o bem estar público (BRASIL, 1954; BIDONE, 2001).

Com o passar dos anos e aumento da preocupação com os impactos causados por práticas inadequadas de manejo dos resíduos sólidos urbanos (RSU), surgiram diversos documentos legais, legislações, resoluções e normas, contendo diretrizes para o correto para correta gestão.

No ano de 2010 entrou em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal 12.305, que dentre suas importantes contribuições, reforçou uma importante determinação estipulada desde o ano de 1954, sendo esta a extinção dos lixões, tendo em vista os impactos causados ao meio ambiente e aos perigos a saúde, segurança e bem estar da população fornecidos por esta prática de disposição final (BRASIL, 1954; 2010).

Conforme informações disponibilizadas no Diagnostico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do ano de 2016, mesmo com esta determinação ainda existe em funcionamento esta tipologia de unidade de disposição no país, sendo um fato preocupante.

Na busca por um desenvolvimento sustentável na área RSU, ações são necessárias, como a universalização da coleta de resíduos, criação de associações de recicladores, bem como a realização de avaliações quanto à implementação de tecnologias e modificações nas configurações dos sistemas de manejo (MERSONI, 2015). No país este exercício de avaliação é reduzido, uma vez que os aterros sanitários são a tecnologia de disposição mais utilizada, sendo outras opções pouco exploradas.

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos gerados abrange a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras formas de destinação admitidas pelos órgãos competentes (BRASIL, 2010). Sendo assim, soluções isoladas e a utilização de apenas uma alternativa para os resíduos sólidos não se apresentam como adequadas para solucionar os problemas existentes.

Para solucionar os torna-se fundamental a realização de planejamento prévio e contínuo dos sistemas de gestão, bem como estudos e análises acerca da melhor configuração a ser adotada, sendo avaliadas as vantagens e desvantagens, considerando sempre as características da região de interesse, visto que cada uma possui suas particularidades.

Desta forma, decisões importantes quanto ao manejo dos resíduos sólidos devem ser tomadas pelos gestores municipais, sendo estas definidas como um processo de análise e escolha entre diversas alternativas disponíveis, buscando sempre a melhor opção a ser seguida (MARINS; SOUZA; BARROS, 2009).

Ferramentas como os modelos de apoio à decisão podem ser utilizadas para auxiliar nestes processos, servindo como suporte, possibilitando que sejam considerados diferentes critérios e alternativas, além de facilitar a comunicação entre as partes interessadas, sendo aplicados nas mais diversas áreas e problemáticas, inclusive para gestão sustentável dos resíduos sólidos (DEWI et al., 2010; SOLTANI, 2014; COBAN et al., 2018).

Neste contexto, com o intuito de contribuir para análise de diferentes opções para o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados em Caxias do Sul e auxiliar os gestores municipais na tomada de decisão em relação a alternativas disponíveis que atendam a realidade municipal, o objetivo deste trabalho foi propor uma rota tecnológica para o manejo sustentável dos resíduos do município, considerando as dimensões ambiental, social e econômica, através da utilização do modelo de apoio a decisão AHP (Analytic Hierarchy Process).

REFERENCIAL TEORICO

Os resíduos sólidos podem ser descritos como um subproduto das atividades humanas, contendo os mesmos materiais presentes nos produtos originais, em estado sólido ou semissólido, descartados por serem consideradas sem valor pelo seu proprietário (MCDOUGALL et al., 2001; Monteiro, 2001). A PNRS os definem como materiais, substancias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas, sendo os domiciliares aqueles originados de atividades domésticas em residências e os limpeza urbana como os originados de varrição, limpeza de logradouros, vias públicas e outros serviços de limpeza (BRASIL, 2010).

Este mesmo instrumento legal também define outra definição importante para área, o termo rejeitos, descritos como resíduos sólidos que não apresentam outra possibilidade se não a disposição final ambientalmente adequada, uma vez que esgotadas suas possibilidades de tratamento e recuperação por tecnologias disponíveis e economicamente viáveis (BRASIL, 2010).

Conhecendo estas definições, entende-se que somente os rejeitos deveriam ser destinados à disposição final, uma vez que os materiais passíveis a outras destinações poderiam ser encaminhado a processos de recuperação e tratamento.

Para Ibrahim (2015), o gerenciamento dos resíduos consiste no conjunto de ações diretas ou indiretas, envolvendo as etapas de coleta, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos e dos rejeitos. O gerenciamento integrado é uma forma diferenciada para o manejo dos resíduos, incorporando uma hierarquia de gerenciamento, que vai desde a geração até a disposição final, buscando a utilização de distintas formas de coleta e tratamento para contemplação de todas as tipologias de resíduos (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993; WHITE et al., 1995).

Tendo em vista que existem diversas tecnologias utilizadas para o tratamento e disposição final dos RSU, devem-se avaliar quais são mais adequadas para cada região, a fim de alcançar um sistema sustentável de gerenciamento, para aproveitamento dos materiais, trazendo melhorias para a sociedade de uma maneira geral.

Jucá et al. (2014) definem rotas tecnológicas como sendo um conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos, desde sua geração até o seu destino final, envolvendo circuitos de coleta, indiferenciados e diferenciados, e fluxo de tecnologias de tratamento, com ou sem valorização energética. A rota tecnológica de resíduos pode combinar diferentes tecnologias, fazendo parte e sendo aplicadas a sistemas de gestão integrada dos RSU (COLVERO, 2014).

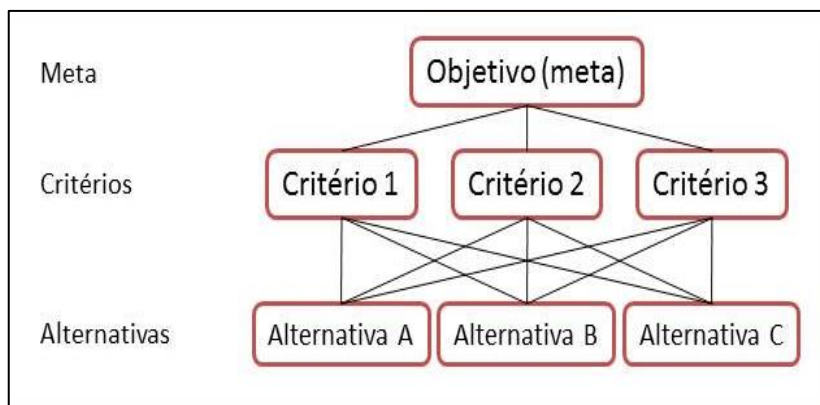
Uma vez que o gerenciamento de resíduos tem seu início nas atividades de coleta, sendo estas diferenciadas ou não, e que os aterros sanitários são necessários uma vez que recebem os rejeitos provenientes de outros processos, considera-se que todas as rotas tecnológicas iniciam nos serviços de coleta e terminam em aterro sanitário, podendo existir outras tecnologias entre estas (FERREIRA et al., 2017). O modo de segregação e coleta dos resíduos impactam diretamente nas escolhas e acabam definindo a configuração do sistema, uma vez que cada tecnologia possui uma finalidade e é designada a uma tipologia de resíduo. O não atendimento destes preceitos e a destinação incorreta de materiais acarretam no não alcance pleno do potencial da tecnologia, o que por consequência pode levar até mesmo a sua inutilização. .

O processo decisório envolve etapas de diagnóstico da situação, obtenção de dados, além da necessidade de conhecimento acerca dos diferentes cenários e possibilidades, dependendo essencialmente da habilidade dos decisores para que se obtenha sucesso nas escolhas tomadas (MENDONÇA e VARVAKIS, 2018; PEREIRA et al., 2018). Este é caracterizado por um grande número de alternativas e critérios, cabendo aos gestores às tarefas de selecionar, ordenar, classificar ou mesmo detalhar, as alternativas tecnológicas disponíveis, considerando múltiplos critérios (LIMA et al., 2014).

Os modelos de apoio à decisão são utilizados para representar de forma simplificada os elementos escolhidos como mais relevantes para situação avaliada (CORNELLI, 2014), sendo uma ferramenta que pode auxiliar no processo decisório.

Os modelos de avaliação multicritério (MCDA - Multi-criteria Decision Analysis), possuem como característica principal, a consideração de vários critérios individuais, e por muitas vezes conflitantes de maneira multidimensional, permitindo aos decisores um maior conhecimento acerca de um problema e proporcionando uma análise sob diferentes pontos de vista (MORRISSEYA E BROWNEB, 2004; REICHERT, 2013; GOULART COELHO et al., 2017).

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) foi um dos primeiros modelos dedicados ao ambiente decisional multicritério. Criado em meados da década de 1970, pelo professor Thomas L. Saaty, este permite a decomposição do problema de decisão em níveis hierárquicos, mostrando as relações entre metas, critérios, subcritérios e alternativas, conforme exemplificado na Figura 1, facilitando assim sua compreensão e avaliação, simplificando vários objetivos e metas em uma única pontuação, em que a alternativa escolhida é a que ao final apresenta a maior valor, permitindo desta forma a modelagem de problemas complexos (LIMA, 2012; GOMES, 2014; SOLTANI, 2014).



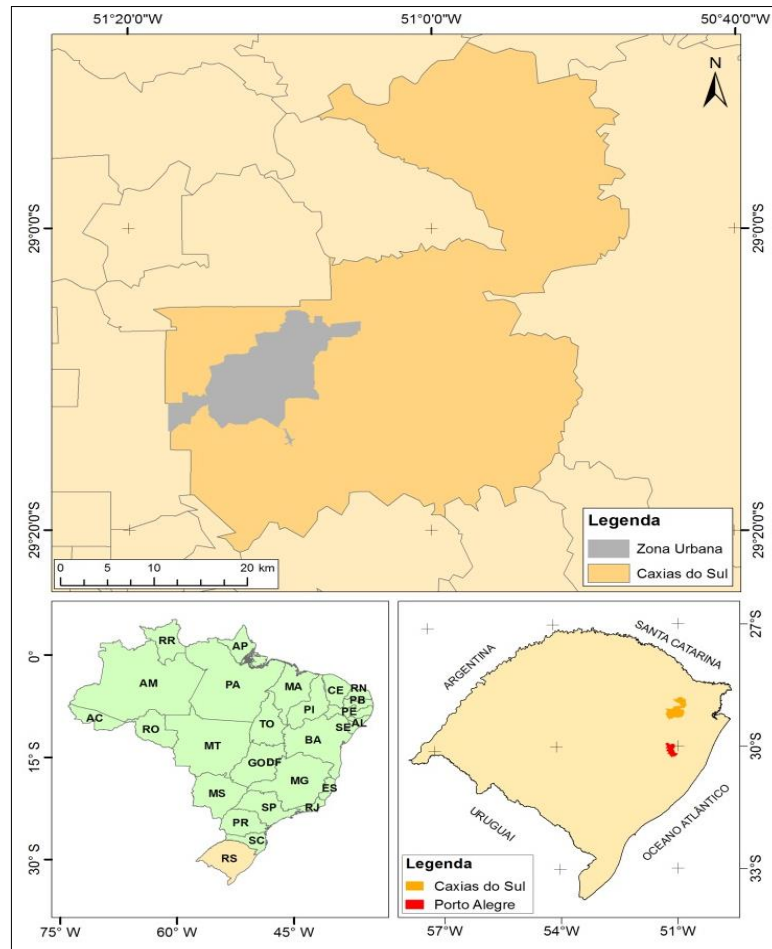
Fonte: adaptado de Azeredo et al. (2009), Lima et al. (2014).

Figura 1: Exemplificação da estrutura do modelo AHP

Goulart Coelho et al. (2016) avaliaram deferentes trabalhos em que modelos multicritérios foram utilizados na área de resíduos sólidos. As problemáticas mais usuais encontradas foram às envolvendo a escolha de localização para instalação de tecnologias e estratégias de gestão. No estudo foi constatado que 35% dos 260 artigos avaliados utilizaram o AHP, demonstrando que o modelo é largamente empregado a problemáticas relacionadas ao manejo de resíduos sólidos.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Caxias do Sul encontra-se localizado ao Sul do país e a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, como pode ser visualizada na Figura 2. Este ocupa uma área territorial de aproximadamente 1.652,308 km² e uma população estimada em 483.377 habitantes, da qual cerca de 96,3% vive em área urbana e 3,7 em área rural (IBGE, 2016, 2017, SIMECS, 2017). Devido a questões relacionadas a saúde, serviços e educação técnica e superior, é uma referencia regional (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAXIAS DO SUL, 2018). Possui uma economia forte e consolidada baseada principalmente em atividades industriais, de serviços e comércio (SIMECS, 2017). Devido a estes fatores, um grande número de imigrantes é atraído para o município, tendo como consequência um crescimento populacional, bem como aumento na quantidade de resíduos gerados no território municipal, tornando-se necessárias avaliações contínuas do sistema de gerenciamento para que este suporte estas mudanças.



Fonte: elaborado a partir de dados do IBGE (2016).

Figura 2: Localização da área de estudo, município de Caxias do Sul

METODOLOGIA

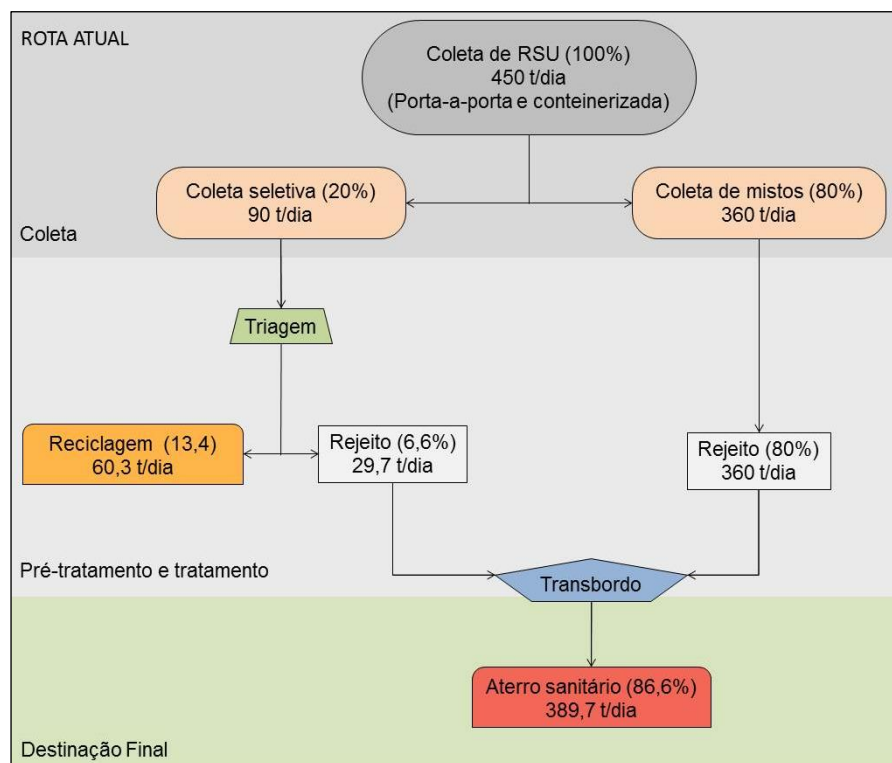
Para o desenvolvimento desta pesquisa a metodologia foi dividida em seis etapas, sendo estas descritas a seguir.

1ª Etapa: Diagnóstico da atual situação do gerenciamento de RSU.

A partir de informações obtidas junto aos órgãos municipais pode-se avaliar o atual cenário de gerenciamento dos resíduos no município, onde foram identificadas as etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento, destinação e disposição final. Os serviços de coletas de atendem 100% da área urbana e cerca de 90% da rural, existindo dois serviços de coleta, a chamada de seletiva e a popularmente conhecida como orgânica. Uma vez que na segunda acabam sendo recolhidas diversas tipologias de resíduos misturados, adota-se o termo “coleta de mistos”.

O município conta com veículos especiais para o transporte dos RSU, possui vínculo com 13 associações de recicladores, incentivando assim a reciclagem de materiais, e dispõe de um aterro sanitário próprio para disposição dos resíduos, o qual conta com sistemas para tratamento dos líquidos e queima dos gases gerados (CODECA, 2018).

A atual rota tecnológica, bem como as quantidades em massa de resíduos referentes a cada etapa do sistema de gerenciamento do município encontram-se representadas na Figura 3.



Fonte: elaborado a partir de Hammes (2016) e Codeca (2018).

Figura 3 - Rota tecnológica atual do Município de Caxias do Sul

2ª Etapa: Proposição de alternativas de rotas tecnológicas para o município

A fim de otimizar o cenário existente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre diferentes tecnologias utilizadas para o tratamento dos RSU, que possibilitou a identificação de alternativas comumente empregadas e já consolidadas em outros países e regiões, sendo elaborados diferentes arranjos tecnológicos para o gerenciamento de resíduos no município. A elaboração das propostas também foi baseada nas metas para o ano de 2019, contidas no PNRS para região Sul do País, como a redução do percentual de resíduos recicláveis e úmidos dispostos em aterros. Ao todo foram propostas quatro configurações de rotas tecnológicas, identificadas como ROTA1, 2, 3 e 4, compostas pelos processos de triagem, reciclagem,

compostagem, digestão anaeróbia (DA), incineração e disposição final em aterro sanitário. Em todas as propostas é considerado inicialmente uma melhoria de x% na separação dos resíduos nas fontes geradoras e a utilização triagem semimecanizada para ambas as coletas, buscando a otimização do processo.

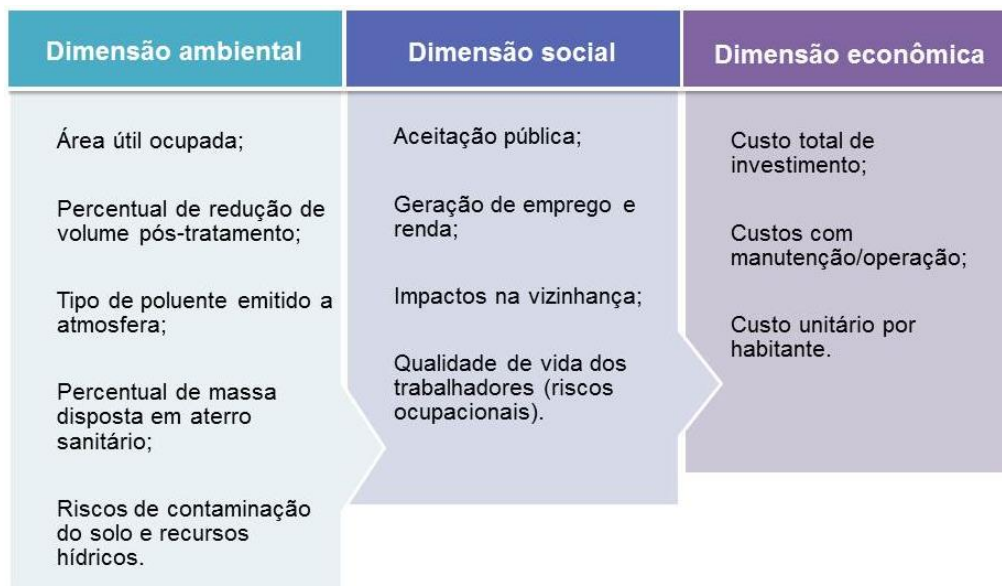
As massas destinadas a cada etapa das propostas são apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1: Massa de resíduos referentes às etapas das propostas de Rotas Tecnológicas

Alternativa	Total coletado (t/d)	Coleta (t/d)		Tratamento (t/d)			Destinação final		
		Coleta Seletiva	Coleta de Mistos	Digestão anaeróbia	Compostagem	Incineração	Aterro Sanitário	Reciclagem	Biodegradação ou combustão
ROTA 1	450	135	315	-	-	-	323,64 (71,92%)	126,36 (28,08%)	-
ROTA 2		135	315	-	79,2	-	203,4 (45,20%)	207 (38,00%)	39,6 (8,80%)
ROTA 3		135	315	79,2	55,44	-	202,21 (44,94%)	196,31 (43,62%)	51,48 (11,44%)
ROTA 4		135	315	-	79,2	203,4	40,68 (9,04%)	207 (46,00%)	39,6 (44,96%)

3º Etapa: Definição dos critérios e subcritérios para avaliação das propostas

Para seleção da melhor alternativa entre as propostas, critérios e subcritérios foram determinados para as avaliações. Estes foram determinados baseando-se que estudos realizados na área de gerenciamento de resíduos. Para os critérios considerou-se os três pilares do desenvolvimento sustentável, sendo abordadas as dimensões ambiental, social e econômica. A estes foram relacionados subcritérios para realização de análises mais completas, sendo estes apresentados na Figura 4.



Fonte: Os autores (2018).

Figura 4: Critérios e subcritérios

4º Etapa: Elaboração e aplicação dos questionários

Para realização das comparações por pares entre os critérios e as alternativas elaborou-se um questionário em que as análises foram baseadas nos subcritérios determinados.

Os questionários foram enviados a 44 profissionais ligados a temática ambiental (funcionários públicos municipais, mestrandos de engenharia e ciências ambientais, graduados em engenharia ambiental, técnicos e consultores ambientais) e ao final de três semanas de aplicação obtiveram-se a contribuição de 16 participantes, sendo alcançado desta forma um índice de resposta igual a 36,4%. Os respondentes possuíam formação em engenharia ambiental, civil, química e ciências biológicas, e o tempo de experiência com o tema variou de 4 a 25 anos.

Os julgamentos foram baseados na escala de valores apresentada no Quadro 2. Após o recebimento das respostas os pesos atribuídos em cada uma das comparações foram sistematizados para do método AHP.

Quadro 2: Escala de valores para os julgamentos

Igualmente preferível	1
Moderadamente preferível	3
Fortemente preferível	5
Muito fortemente preferível	7
Extremamente preferível	9
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8

Fonte: Saaty (1991).

5° Etapa: Aplicação do Método de apoio à decisão AHP

A moda, valor que por mais vezes se repetiu nas avaliações por pares, foram inseridos em matrizes de comparação do Software Expert Choice. Este é um programa utilizado na tomada de decisão para aplicação do método AHP, fornecendo a hierarquização das alternativas, bem como gráficos para análise dos resultados.

6° Etapa: Análise dos resultados

Os resultados obtidos pela aplicação do método AHP foram fornecidos pelo Software Expert Choice em forma de gráficos, tabelas e imagens, facilitando a interpretação da escala hierárquica das propostas de rotas tecnológicas.

7° Etapa: Análise de sensibilidade

A fim de avaliar as consequências de possíveis mudanças nos pesos atribuídos as comparações por pares entre os critérios, os resultados foram submetidos a uma análise de sensibilidade, podendo avaliar o quão robusta é a decisão. Para esta também utilizou-se o software Expert Choice.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado das avaliações dos critérios definidos, evidenciou-se que a dimensão ambiental apresentou o maior percentual de peso com 60%, enquanto as dimensões social e econômica ficam empatadas recebendo o mesmo valor, 20%, conforme é apresentado no Quadro 3.

Um maior número de participantes avaliou que o critério ambiental é mais importante que os demais para avaliação de uma rota tecnológica para o gerenciamento dos RSU. Esta percepção constatada pode ser explicada pelo fato de grande parte dos especialistas participantes possuírem formação na área ambiental, influenciando nos resultados.

Por meio da avaliação dos participantes pode-se perceber que os mesmos acreditam que o critério econômico pode não ser determinante no processo decisório, sendo possível a escolha por alternativas que necessitam maiores recursos financeiros, mas que apresentam mais benefícios ambientais e sociais.

Quadro 3: Ordem de preferência dos critérios de avaliação

Critério	Prioridade (%)
Ambiental	60
Econômico	20
Social	20

Na Figura 5 pode ser visualizada a ordem de preferência global das alternativas de rotas tecnológicas propostas, bem como a hierarquização destas em relação a cada um dos três critérios avaliados.

Avaliando o resultado global, a alternativa nomeada como Rota 4, foi a que apresentou o maior valor, sendo considerada a melhor opção entre as avaliadas. Esta é seguida pelas propostas Rota 1 e Rota 2, ficando na última posição a Rota 3, analisada como a menos indicada para implementação no gerenciamento de resíduos do município de Caxias do Sul.

A alternativa, Rota 4, também ocupou o primeiro lugar em relação aos critérios ambiental e social. Por ser composta de diferentes tecnologias de recuperação e tratamento de resíduos, esta pode proporcionar um aumento da geração de emprego e renda, tornando-se algo muito positivo em relação à questão social. Referente ao critério ambiental, a preferência por esta alternativa pode ser explicada pelos subcritérios considerados, como percentual de redução de volume pós-tratamento e percentual de massa disposta em aterro sanitário, uma vez que neste arranjo tecnológico este percentual é inferior às demais, já que resíduos passam pelo processo de incineração, sendo somente os rejeitos desta etapa destinados à disposição final. A redução da quantidade de resíduos enviada a aterros acarreta na diminuição da necessidade por grandes áreas e dos riscos de contaminação do solo e de recursos hídricos.

Mersoni e Reichert (2017) avaliaram cenários de gerenciamento de resíduos para o município de Garibaldi, localizado no estado do Rio Grande do Sul, através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Por meio desta técnica aplicada como ferramenta de apoio à tomada de decisão, os autores concluíram que as rotas tecnológicas que apresentaram melhor desempenho ambiental, foram as que combinaram reciclagem e compostagem, reciclagem, DA e compostagem, reciclagem, compostagem e incineração. Este resultado vai de encontro com o constatado neste estudo, em que a reciclagem, a compostagem e a incineração apresentam vantagens importantes em relação ao meio ambiente.

Já em relação ao critério econômico, a melhor alternativa dentre as avaliadas seria a Rota 1. Tendo em vista que esta considera um menor número de processos de recuperação e

tratamento, com mudanças menos impactantes, sem a inserção de novas tecnologias, consequentemente requer menores investimentos e gastos com operação.

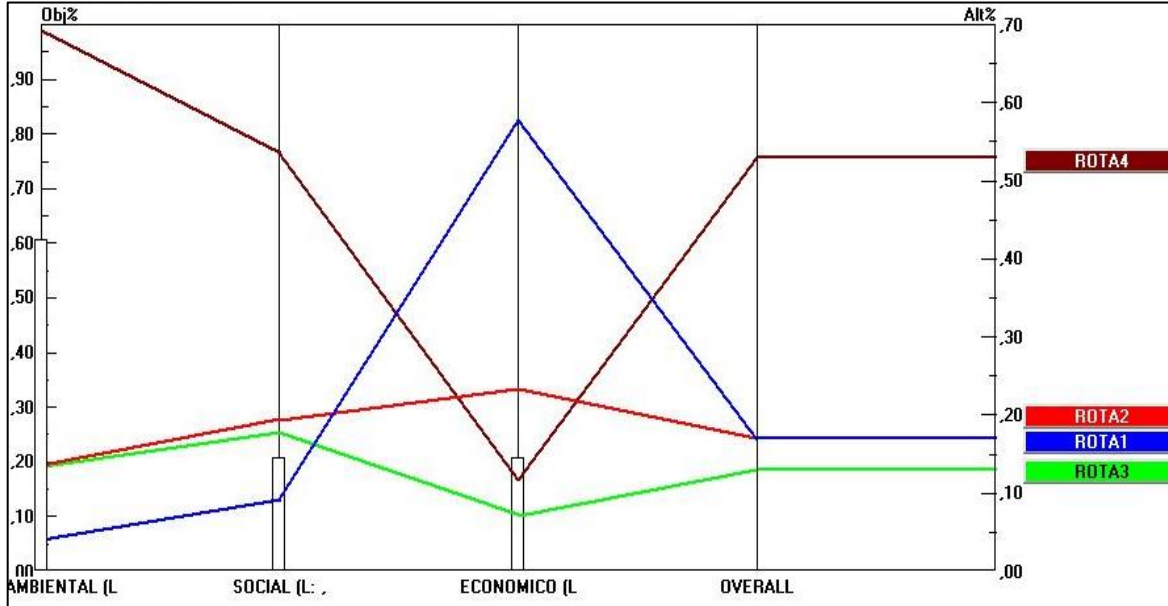


Figura 5: Ordem de prioridade global e por critério

Os valores atribuídos a cada proposta, bem como o índice de inconsistência, podem ser observados na Figura 6. Este foi de 0,06, ou seja, 94% de consistência, atendendo plenamente o valor máximo aceitável estipulado pelo método de 0,10.

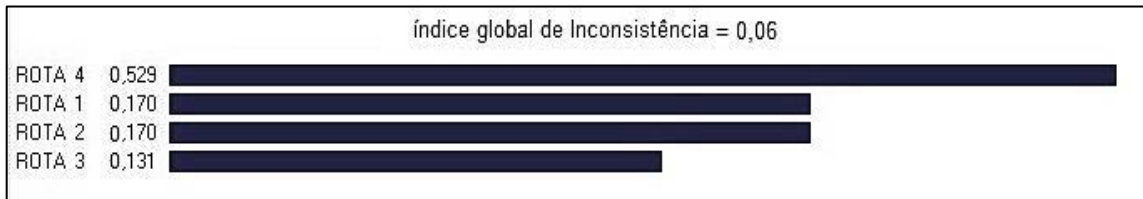


Figura 6: Ordem de prioridade das alternativas de rotas tecnológicas e índice de inconsistência

Lima et al. (2014) aplicaram o método AHP juntamente com o modelo Promethee, para análise de tecnologias para o manejo dos RSU da região sul do Brasil. As melhores classificadas nas hierarquias foram selecionadas para elaboração de arranjos tecnológicos, sendo indicadas para diferentes cenários. Segundo os autores, a rota tecnológica formada por reciclagem e aterro sanitário sem geração de energia, atual cenário do município de Caxias do Sul, é indicada para regiões menores, em localidades que não possuem sistemas de gestão, ocorrendo a disposição inadequada dos RSU destes, não sendo a realidade de Caxias do Sul.

Por ser mais simples, essa configuração acaba sendo adotada em regiões que apresentam potencial para implantação de tecnologias mais complexas, dispondo de recursos financeiros que poderiam ser investidos no gerenciamento dos resíduos. Este estudo indica a utilização de tecnologias como a DA, compostagem, incineração com geração de energia e aterro sanitário com geração de energia.

Apesar de ser uma tecnologia utilizada em diferentes regiões pelo mundo, a utilização da incineração ainda gera controversas. Em estudos como o realizado por Marchezetti et al. (2011), em que se utilizou o método AHP para avaliar diferentes alternativas tecnológicas para o tratamento dos RSU da região Metropolitana de Curitiba, a incineração apresentou-se como menos adequada em relação aos critérios avaliados, como custos de investimento e emissão de poluentes a atmosfera. Assim como outras alternativas, a incineração dependem dos resíduos destinados a ela, desta forma deve ser considerado princípios básicos como a redução na origem, ou mesmo a adoção de tecnologias precedentes, as quantidades a serem incineradas são reduzidas, devendo ser avaliado com critério sua viabilidade.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A fim de garantir a consistência dos resultados obtidos, bem como para verificar a estabilidade da hierarquização das alternativas, por meio da interface gráfica do software Expert Choice, foi realizada uma análise de sensibilidade.

Esta possibilitou a avaliação de diferenças no resultado caso possíveis mudanças nos pesos atribuídos aos critérios principais ocorressem. Estes tiveram seus pesos alterados, sendo possível constatar que algumas das variações realizadas influenciaram na ordem de prioridade das alternativas.

Mudanças no cenário justificando em um aumento na preferência pelo critério social, não resultariam em diferenças no resultado final obtido. Já se o critério econômico fosse considerado mais relevante frente aos demais, constatou-se que a ordem de prioridade seria alterada. Em um cenário onde os critérios ambiental e social fossem igualmente preferíveis, somente se a dimensão econômica representasse mais de 50% do peso a hierarquia sofreria uma alteração, onde a Rota 1 ocuparia a primeira posição e a Rota 4 cairia para segundo lugar, conforme exemplificado na Figura 7.

É possível concluir que mesmo com alterações mais drásticas nas prioridades, as Rotas 2 e 3 continuariam sendo consideradas inadequadas para realidade de Caxias do Sul, segundo a análise dos especialistas convidados.

Vale ressaltar que a curto prazo poderia ser considerada a implantação da Rota 1, mas avaliando os benefícios sociais e ambientais que poderiam ser alcançados pela escolha da Rota 4, esta apresenta-se como mais adequada na busca pelo manejo sustentável dos resíduos.

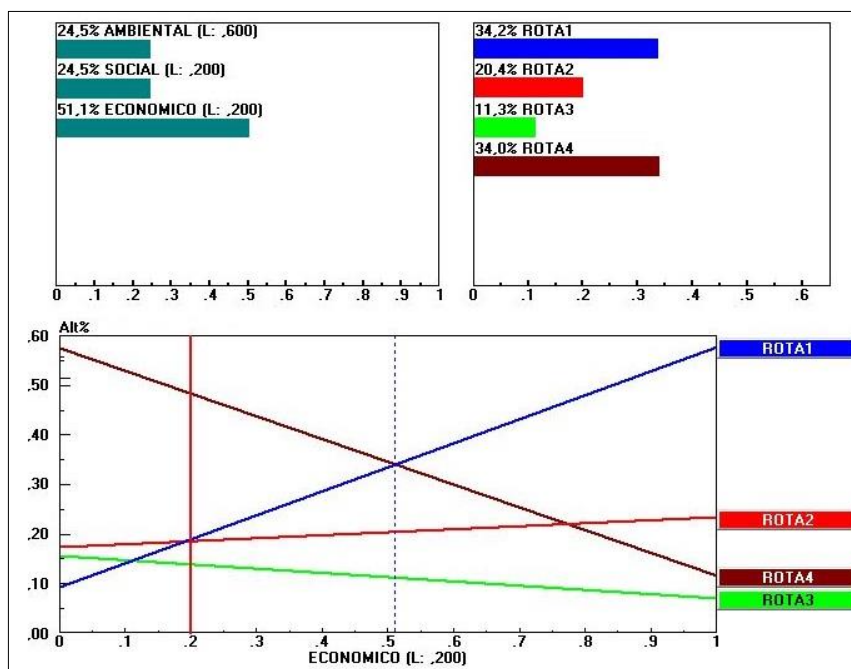


Figura 7: Ordem de prioridade das alternativas após análise de sensibilidade

CONCLUSÕES

A metodologia AHP aplicada neste estudo mostrou-se como uma ferramenta eficiente para hierarquização das alternativas propostas e seleção da mais adequada entre estas, segundo os especialistas convidados, para o gerenciamento de RSU de Caxias do Sul. Podendo ser utilizada em diferentes situações, auxiliando no processo decisório, o tornando mais simples e abrangente, uma vez que é capaz de integrar distintos critérios de avaliação, mesmo conflitantes, além de possibilitar a integração da opinião de diversos especialistas da área de interesse.

A alternativa nomeada como Rota 4, composta por dois tipos de coleta (coleta de recicláveis e coleta de mistos), triagem, reciclagem, compostagem, incineração, transbordo e aterro sanitário, foi selecionada como preferível, considerada como a mais adequada para o gerenciamento dos resíduos municipais. A integração de diferentes práticas e processos é capaz de trazer inúmeros benefícios em termos sociais e ambientais, reduzindo os impactos causados ao meio ambiente, possibilitando a geração de emprego e renda. Mesmo necessitando o investimento de quantias mais expressivas para implantação e operação, os benefícios em outras dimensões devem ser considerados. Os custos gastos em rotas

tecnológicas mais complexas são minimizados com a venda de materiais, composto ou mesmo de energia, caso esta também seja abrangida.

Por meio da análise de sensibilidade dos dados é possível constatar a confiabilidade da aplicação do método. Alterações na hierarquia somente iriam ocorrer se as dimensões ambientais e sociais apresentassem o mesmo peso e mais de 50% da preferência fosse referente ao critério econômico.

Uma vez que a hierarquização dependem fundamentalmente das contribuições feitas pelos especialistas convidados, os resultados são fortemente influenciados pelas concepções individuais e experiências adquiridas. Desta forma, dependendo da amostra, os valores de julgamentos podem ser diferentes, acarretado em mudanças nos resultados.

Sugere-se que em trabalhos futuros sejam considerados outros critérios de avaliação como a dimensão política, que exerce grande influencia nas decisões, uma vez que a troca de gestores pode acarretar na não continuidade de um projeto. Pode-se também avaliar diferentes arranjos tecnológicos, com distintos tipos de coleta, como a seletiva de resíduos orgânicos.

REFERÊNCIAS

AZEREDO, J.S.; PAULA JUNIOR, G.G.; SANTOS, R.B.O.; BARRETO, D.N.S.; GONÇALVES, T.J.M. Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para a seleção de um sistema integrado de gestão (ERP). In: XXIX Encontro Nacional De Engenharia De Produção, Salvador, 2009.

BIDONE, F.R.A. Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: eliminação e valorização. Porto Alegre: Prosab, 2001.

BRASIL (1954). Lei nº 2.312, de 03 de setembro de 1954. Institui as Normas Gerais sobre Defesa e Proteção da Saúde. Brasília: Senado Federal.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Senado Federal.

_____. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos, 2017.

COBAN, A.; ERTIS, I.F.; CAVDAROGLU, N.A. Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, v. 180, 2018, p. 159-167.

COLVERO, D.A. *Análise das rotas tecnológicas existentes para os resíduos sólidos urbanos no município da Cidade Ocidental – GO.*130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade

Federal de Goiás, Programa de Pesquisa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, 2014.

CODECA - Companhia de Desenvolvimento de Caxias Do Sul. (2018). Coletas. Disponível em <<http://www.codeca.com.br/>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

CORNELLI, R. *Análise e seleção de alternativas sustentáveis de esgotamento sanitário*. 136 f. Tese (Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2014.

DEWI, O.C.; KOERNER, I.; HARJOKO, T.Y. A review on decision support models for regional sustainable waste management. In: The International Solid Waste Association World Conference. 2010.

FERREIRA, C.F.A.; JUCÁ, J.F.T. Metodologia para avaliação dos consórcios de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria Ambiental*, v. 22, 2017, p. 513-521.

GOMES, L.F.A.M. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. São Paulo. *Atlas*, 2014.

GOULART COELHO, L.M.; LANGE, L.C.; COELHO, H.MG. Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Management & Research*, v. 35, n. 1, 2017, p. 3-28.

HAMMES, M. *Organização dos catadores de resíduos: uma análise a partir de variáveis socioeconômicas e do ambiente de trabalho*. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2016.

IBRAHIN, F.I.D. *Análise ambiental: Gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes*. São Paulo. Erica, 2015.

JUCÁ, J.F.T. (Coord.). *Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboação dos Guararapes*, PE: Grupo de resíduos sólidos - UFPE, 2014. 184 p.

LIMA, J.D.; JUCÁ, J.F.T.; REICHERT, G.A.; FIRMO, A.L.B. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. *Engenharia Sanitaria Ambiental*, v. 19, 2014, p. 33-42.

LIMA, J.D. *Modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil*. 400 f. Tese (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

Marins, C.S.; Souza, D.O.; Barros, M.S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bahia. 2009.

MCDUGALL, F.R.; WHITE, P.R.; FRANKE, M.; HINDLE, P. *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*. 2 ed. Grã-Bretanha: Blackwell Publishing, 2001. 544 p.

MENDONÇA, T.C.; VARVAKIS, G. Análise do uso da informação para tomada de decisão gerencial em uma instituição bancária. *Perspectivas em ciências da informação*, v. 23, n. 1, 2018, p. 104-119.

MERSONI, C., REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 22, n. 5, p. 863-875, set/out 2017.

MONTEIRO, J.H.P. (Coord.). *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. Janeiro: IBAM/SEDU, 2001, p. 200.

MORRISSEY, A.J., BROWNE, J. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste management*, v. 24, 2004, p. 297-308.

PEREIRA, R.M.C.; BATISTA, J.F.; ARAÚJO, L.S.; GERHARDT, B.F. Diagnóstico regional como suporte à tomada de decisão sobre itinerários formativos: experiências metodológicas do observatório do IFRO. *Revista Presença Geográfica*, v. 7, n. 2, 2018, p. 36-45.

REICHERT, G.A. *Apoio à 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*. 276 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2013.

REICHERT, G.A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 19, n. 3, p. 301-313, jul/set 2014.

SAATY, T.L. Some mathematical concepts of the analytic hierarchy process. *Behaviormetrika*, v.29, 1991, p. 1-9.

SOLTANI, A.; HEWAGE, K.; REZA, B.; SADIQ, R. Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. *Waste Management*, v. 35, 2015, p. 318-328.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. Boston, US: McGraw-Hill, 1993.

WHITE, P.R.; FRANKE, M; HANDLE, P. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. GAITHERSBURG, MD, 1995.