



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM LOGÍSTICA E
PESQUISA OPERACIONAL**

LUIZ NETO PAIVA E SILVA MULLER

**GESTÃO INTEGRADA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: UMA ABORDAGEM À LUZ
DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

FORTALEZA-CE

2016

LUIZ NETO PAIVA E SILVA MULLER

**GESTÃO INTEGRADA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: UMA ABORDAGEM À LUZ
DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Logística e Pesquisa Operacional da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Logística e Pesquisa Operacional. Área de concentração: Gestão Logística.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Furtado Arruda.

FORTALEZA-CE

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M923g Muller, Luiz Neto Paiva e Silva.

Gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos no município de Juazeiro do Norte, Ceará : uma abordagem à luz da política nacional de resíduos sólidos / Luiz Neto Paiva e Silva Muller. – 2016.
127 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Logística e Pesquisa Operacional, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. João Bosco Furtado Arruda.

1. Política nacional de resíduos sólidos. 2. Tratamento de RSU. 3. Método de apoio à decisão AHP. 4. Critérios de sustentabilidade. I. Título.

CDD 658.5

LUIZ NETO PAIVA E SILVA MULLER

**GESTÃO INTEGRADA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO
MUNICÍPIO DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: UMA ABORDAGEM À LUZ
DA POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Logística e Pesquisa Operacional da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Logística e Pesquisa Operacional. Área de concentração: Gestão Logística.

Aprovada em: 05/08/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Bosco Furtado Arruda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Abraão Freires Saraiva Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João Welliandre Carneiro Alexandre
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alceu de Castro Galvão Junior (Examinador Externo)
Secretaria Estadual das Cidades do Ceará

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Reginaldo Nogueira Müller e Maria Elizabeth Paiva e Silva Müller, e aos meus irmãos, Lucas Paiva e Silva Müller e Maria Ângela Paiva e Silva Müller, que sempre estiveram presentes na minha vida e por serem as pessoas sem as quais teria sido impossível cursar este Mestrado.

Nominalmente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Bosco Arruda, que pacientemente ouviu minhas dúvidas e direcionou esta dissertação de forma profissional e humana, e ao Prof. Dr. João José Hiluy Filho, que ajudou consideravelmente na obtenção de dados e informações.

Agradeço ao Superintendente da Autarquia Municipal do Meio Ambiente de Juazeiro do Norte, Eraldo Oliveira, e ao Diretor de Monitoramento Ambiental, André Wirtzbiki, os quais foram extremamente solícitos e receptivos, sendo essenciais para a etapa de aplicação da pesquisa de campo.

Aos especialistas os quais contribuíram na etapa de aplicação de questionário, tornando possível a conclusão deste trabalho: Dr. Alceu Galvão, Dra. Maria Dias, Expedito Parente Junior, Milson Bastos, José Neiva, Prof. Dr. João José Hiluy Filho, David Vieira Rocha e Luis Henrique Nunes Quezado.

Aos examinadores, Prof. Dr. Abraão Freires Saraiva Júnior, Prof. Dr. João Welliandre Carneiro Alexandre e Dr. Alceu Galvão, pelas suas contribuições e pela cordial atenção em avaliar este estudo.

A todos os professores do Geslog e amigos de sala de aula, que pudemos compartilhar conhecimento e bons momentos. Em especial ao Waldson Alcantara, companheiro de viagem.

Agradeço aos funcionários do Geslog, que puderam manter um ambiente institucional agradável para realização das atividades, em especial ao estimado Thiago.

RESUMO

A gestão ineficaz e ineficiente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) causa inúmeros problemas, exigindo dos atores envolvidos iniciativas sustentáveis de melhorias, de forma a mitigar os impactos negativos, potencializar os impactos positivos e atender a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Esta dissertação tem o objetivo de diagnosticar e propor soluções para a gestão integrada dos RSU do município de Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará. A metodologia é de natureza qualitativa e quantitativa, utilizando algumas etapas da metodologia sistêmica de solução de problemas SSM de Peter Checkland, definições da PNRS, técnicas quantitativas de projeção, método de apoio à decisão AHP, critérios de sustentabilidade e informações e dados secundários. O diagnóstico destaca que Juazeiro do Norte apresenta problemas de quase inexistência de triagem na origem, falta de coleta seletiva, deficiência de integração entre participantes da cadeia produtiva e quebra da hierarquia regulatória devido à falta de unidades de tratamento, causando grandes impactos ambientais negativos e perda significativa de resíduos com valor econômico e potencial de geração de empregos. Estima-se que, nos próximos 20 anos, caso nada seja feito, os resíduos coletados e enterrados no aterro controlado de Juazeiro do Norte nesse período ocuparão uma área equivalente a 22 campos de futebol (153.212 m²) e emitirão aproximadamente 159.341 toneladas de gás metano e 437.195 toneladas de gás carbônico que se estenderão nos próximos 40 anos. Assim, a fim de propor uma solução, o presente estudo avalia os resultados de diferentes critérios (ambiental, econômico, social, técnico e regulatório) obtidos em 5 alternativas de tratamento de RSU definidas a partir de boas práticas presentes no Brasil e no Mundo mesclando unidades de tratamento mecânico, biológico e térmico, e divididas em modelos centralizado e descentralizado. Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que as alternativas 03 (centro de triagem e digestor anaeróbico descentralizados) e 01 (centro de triagem e unidade de compostagem descentralizados) são as opções de tratamento de RSU mais favoráveis para Juazeiro do Norte, com percentual de 25,11% e 24,97%, respectivamente. As alternativas descentralizadas 01 e 03 levam vantagem sobre as alternativas centralizadas 04, 02 e 05 devido, principalmente, à maior geração de empregos e viabilidade técnica.

Palavras-chave: Política nacional de resíduos sólidos. Tratamento de RSU. Método de apoio à decisão AHP. Critérios de sustentabilidade.

ABSTRACT

An ineffective and inefficient Municipal Solid Waste (MSW) management causes numerous problems, requiring stakeholders the planning of sustainable initiatives in order to mitigate the negative impacts, enhance positive impacts and meet the National Policy on Solid Waste (PNRS). This thesis aims to diagnose and propose solutions for the MSW management in Juazeiro do Norte, Ceará. The methodology is qualitative and quantitative, using some stages of Checkland's systemic methodology SSM, PNRS settings, quantitative projection techniques, AHP decision-making method, sustainability criteria and secondary information and data. The diagnosis points out that the city of Juazeiro do Norte, in the state of Ceará, has problems of almost no sorting at source, lack of selective collection, inefficiency integration between participants of the production chain and break of the regulatory hierarchy due to the lack of MSW treatment units, causing major negative environmental impacts and a significant loss of solid waste with economic value and potential for job creation. It is estimated that in the next 20 years if nothing is done, the waste collected and buried in the landfill of Juazeiro do Norte in this period, will occupy an area equivalent to 22 soccer fields (153,212 m²) and will emit approximately 159,341 tons of methane and 437,195 tons of carbon dioxide that will extend over the next 40 years. Thus, in order to propose a solution, this study evaluates the results obtained on different criteria (environmental, economic, social, technical and regulatory) in five different MSW treatment alternatives based on good practices present in Brazil and the world and which mix mechanical, biological and thermal treatment plants, being divided into centralized and decentralized models. Based on the results, the alternatives 03 (decentralized sorting centers and anaerobic digesters) and 01 (decentralized sorting centers and composting plants) are the MSW treatment options more favorable to Juazeiro do Norte, with a percentage of 25.11% and 24.97%, respectively. The decentralized alternatives 01 and 03 have an advantage over the centralized alternatives 04, 02 and 05 due mainly to higher job creation and technical feasibility.

Keywords: National policy on solid waste. MSW treatment. AHP decision-making method. Sustainability criteria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da Pesquisa	20
Figura 2: Atores/Fatores atuantes em um sistema organizacional	23
Figura 3: Acoplamento estrutural entre sistemas	24
Figura 4: As complexas interações nos sistemas de gestão de RS	25
Figura 5: Situação não estruturada	27
Figura 6: Modelo convencional SSM em 7 passos	27
Figura 7: Representação do Método LCA	29
Figura 8: Estrutura hierárquica simples AHP	31
Figura 9: Etapas do sistema de gestão de resíduos sólidos.....	42
Figura 10: Ordem de prioridade da gestão e gerenciamento de RS segundo a PNRS ...	45
Figura 11: Etapas da metodologia	63
Figura 12: Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos de Juazeiro do Norte	65
Figura 13: Localização da Região Metropolitana do Cariri	69
Figura 14: Localização do aterro controlado de Juazeiro do Norte.....	74
Figura 15: Abrigo dos catadores no aterro controlado de Juazeiro do Norte	75
Figura 16: Despejo dos RSU no aterro controlado de Juazeiro do Norte.....	75
Figura 17: Material reciclável separado e embalado	76
Figura 18: Fluxo dos RSU de Juazeiro do Norte.....	77
Figura 19: Critérios e subcritérios de avaliação	85
Figura 20: Alternativas de tratamento de RSU.....	86
Figura 21: Estrutura hierárquica AHP	88
Figura 22: Peso dos critérios e subcritérios	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Gravimetria dos RS de diferentes tipos de países	40
Gráfico 2: Custo de implantação de unidades de triagem	48
Gráfico 3: Custo de operação e manutenção de unidades de triagem	49
Gráfico 4: Custo de implantação de unidades de compostagem	52
Gráfico 5: Custo de operação e manutenção de unidades de compostagem	52
Gráfico 6: Projeção de geração de RSU em Juazeiro do Norte - 2016 a 2035 (toneladas/ano).....	81
Gráfico 7: Estimativa de geração de CH ₄ e CO ₂ a partir dos RSU enterrados nos próximos 20 anos em Juazeiro do Norte (tonelada por ano)	83
Gráfico 8: Ranking das alternativas por critério.....	99
Gráfico 9: Ranking geral das alternativas.....	100
Gráfico 10: Análise de sensibilidade do critério econômico	102
Gráfico 11: Análise de sensibilidade do critério ambiental.....	102
Gráfico 12: Análise de sensibilidade do critério social	103
Gráfico 13: Análise de sensibilidade do critério técnico	103
Gráfico 14: Análise de sensibilidade do critério regulatório	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos sistemas.....	25
Quadro 2: Escala fundamental de Saaty para comparar duas alternativas	33
Quadro 3: Especialistas participantes da avaliação	66
Quadro 4: Cálculo da geração de RSU em Juazeiro do Norte (2015).....	70
Quadro 5: Frequência de coleta nas fontes geradoras de RSU.....	72
Quadro 6: Valores dos materiais recicláveis vendidos pela Associação Engenho do Lixo	74
Quadro 7: Projeção de RSU enterrado no aterro controlado de Juazeiro do Norte (tonelada por ano).....	82
Quadro 8: Características de diferentes unidades de tratamento de RSU	87
Quadro 9: Custo anual de implantação, operação e manutenção das alternativas	90
Quadro 10: Receita anual gerada pelos produtos das alternativas.....	92
Quadro 11: Emissão de CH ₄ e CO ₂ nas alternativas consideradas.....	93
Quadro 12: Volume de ocupação do aterro nas alternativas	94
Quadro 13: Empregos gerados nas alternativas.....	95
Quadro 14: Viabilidade das alternativas consideradas	96
Quadro 15: Adequação regulatória das alternativas	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AMAJU	Autarquia Municipal de Meio Ambiente de Juazeiro do Norte
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
FADE	Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLEN	Grupo de Estudo e Pesquisa em Infraestruturas de Transporte e Logística da Energia
IDECI	Instituto de desenvolvimento institucional das cidades do Ceará
ILSR	<i>Institute For Local Self-Reliance</i>
LandGEM	<i>Landfill Gas Emissions Model</i>
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida
MAUT	Teoria da Utilidade Multiatributo
MCDM	Método Multicritério de Apoio à Decisão
MJ	<i>Megajoule</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MWh	<i>Megawatt</i> Hora
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Promethee	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
RMC	Região Metropolitana do Cariri
RS	Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RUL	Reciclagem, Utilização e Disposição Final
SSM	<i>Soft Systems Methodology</i>
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
Ton	tonelada
WTE	<i>Waste to Energy</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Real
%	Porcentagem
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 PROBLEMÁTICA E O PROBLEMA.....	14
1.1.1 Problemática.....	14
1.1.2 Problema de pesquisa.....	16
1.1.3 Hipótese de pesquisa.....	16
1.2 QUESTÕES DE PESQUISA.....	17
1.2.1 Questões de pesquisa – Ponto de vista teórico.....	17
1.2.2 Questões de pesquisa – Ponto de vista prático.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 METODOLOGIA.....	19
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	20
2 ABORDAGEM SISTÊMICA NA GESTÃO DOS RS.....	22
2.1 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS DE SISTEMAS.....	22
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS.....	24
2.3 ANÁLISE DE SISTEMAS E TÉCNICAS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO.....	26
2.3.1 Abordagem de solução de problemas.....	26
2.3.2 Métodos de Apoio à Decisão.....	29
2.3.3 Critérios de sustentabilidade.....	33
2.3.4 Modelos de projeção.....	35
2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	37
3 GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	38
3.1 EVOLUÇÃO DA GESTÃO INTEGRADA DE RS.....	38
3.2 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS.....	39
3.2.1 Conceitos.....	39
3.2.2 Classificação dos resíduos sólidos.....	41
3.2.3 Etapas da gestão de Resíduos Sólidos (RS).....	41
3.2.4 Modelo centralizado e descentralizado.....	43
3.3 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	44
3.4 BOAS PRÁTICAS DE TRATAMENTO DE RSU NO BRASIL E NO MUNDO.....	47
3.4.1 Tratamento mecânico.....	48
3.4.2 Tratamento Biológico.....	51
3.4.3 Tratamento térmico.....	56
3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
4 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	60
4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	60
4.1.1 Classificação da pesquisa.....	60

4.1.2 Levantamento de dados e informações.....	62
4.2 ETAPAS DA METODOLOGIA	63
5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	68
5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO....	68
5.1.1 Informações gerais de Juazeiro do Norte.....	68
5.1.2 Sistema de gestão de RSU de Juazeiro do Norte	69
5.2 DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DO SISTEMA DE RSU	78
5.2.1 Diagnóstico.....	78
5.2.2 Prognóstico.....	80
5.3 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA (AHP)	84
5.3.1 Objetivo geral	84
5.3.2 Critérios e subcritérios de avaliação	84
5.3.3 Alternativas de tratamento de RSU	85
5.3.4 Estrutura hierárquica	88
5.4 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS	89
5.4.1 Premissas assumidas	89
5.4.2 Critério econômico	89
5.4.3 Critério ambiental	92
5.4.4 Critério social.....	94
5.4.5 Critério técnico.....	95
5.4.6 Critério regulatório	96
5.5 AVALIAÇÃO DO PESO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS.....	97
5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	98
5.6.1 Resultados e discussão	98
5.6.2 Análise de sensibilidade	101
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	105
6.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	108
6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	109
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 01 - PESQUISA DE CAMPO	122
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 02 - AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS	125
ANEXO A – CICLO DE PALESTRA GLEN	127

1. INTRODUÇÃO

O Capítulo 1 tem a finalidade de introduzir a pesquisa. Ele expõe a problemática, o problema, a hipótese, as questões de pesquisa, os objetivos, a metodologia e a estrutura do relatório de pesquisa. Primeiramente, a problemática e o problema são apresentados, possibilitando o entendimento do cenário pesquisado, assim como da importância de se estudar o problema levantado. Em seguida, a fim de guiar a pesquisa, levantou-se a hipótese de pesquisa. Depois, vindas da problemática e do problema, exibem-se as questões de ponto de vista teórico e prático, as quais motivarão e instigarão a pesquisa. Posteriormente, são mostrados o objetivo geral e os específicos. Por fim, aborda-se sucintamente a metodologia da pesquisa e descrevem-se as partes da que compõem a presente Dissertação.

1.1 PROBLEMÁTICA E O PROBLEMA

1.1.1 Problemática

Nos últimos anos, a preocupação com a conservação do meio ambiente e o futuro do nosso planeta tornou-se um assunto recorrente e, por esse motivo, houve vários estudos com o intuito de entender, planejar e implantar soluções em busca de um mundo mais sustentável. Um desses estudos, chamado “What a Waste” e realizado pelo Banco Mundial (2012), aponta um cenário futuro bem preocupante. Nesse relatório, estima-se que a produção mundial anual de resíduos sólidos, que em 2012 era cerca de 1,3 bilhões de toneladas, alcance a quantidade de 2,2 bilhões de toneladas em 2025; esse aumento seria de quase 100% em apenas 13 anos e, caso nada seja feito, contribuirá significativamente para a evolução de vários impactos negativos como o efeito estufa (maior geração de dióxido de carbono e gás metano), a poluição do ar, a poluição das águas e os problemas de saúde pública (doenças respiratórias, diarreia, dengue, entre outros).

No Brasil, estudos realizados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012; 2013; 2014; 2015) apontam que, nos anos de 2011 até 2014, o país teve aumento na taxa anual de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) maior do que a taxa de crescimento populacional. Além disso, dados mostram que, em 2014, 41,6% dos RSU coletados foram dispostos em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2015).

Portanto, a geração per capita de RSU vem aumentando e quase metade dos RSU coletados no Brasil ainda são dispostos em sistemas que não possuem o conjunto de dispositivos necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Entre as cinco regiões do Brasil, o Nordeste é a segunda maior geradora de RSU sendo responsável por cerca de 1/4 (55.177 t/dia) do total produzido pelo País, dos quais 78,5% são coletados; um pouco mais de 2/3 desses resíduos coletados são dispostos em aterros controlados ou lixões, percentual 22% maior do que a média atual nacional. Grande parte desses resíduos dispostos em lixões ou aterros, aproximadamente 32%, são recicláveis (ABRELPE, 2012) e, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), possuem valor econômico e social que geram trabalho e renda e desenvolve cidadania, logo deve-se evitar a disposição desses materiais em lixões ou aterros e incentivar a indústria da reciclagem. Isso mostra a importância do Nordeste nessa problemática e, conseqüentemente, do Estado do Ceará, que é um dos maiores responsáveis pela geração de RSU na região (9.711 t/dia), perdendo apenas para o Estado da Bahia (ABRELPE, 2015).

Ghosh (2014) afirma que a gestão dos Resíduos Sólidos (RS) é crucial para o alcance de um desenvolvimento sustentável. A fim de mitigar os principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes da gestão/gerenciamento ineficaz e ineficiente dos resíduos sólidos e criar um ambiente propício para um desenvolvimento sustentável no Brasil, foi criada a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) cita, entre seus principais objetivos, a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, o incentivo à indústria da reciclagem, a contribuição para inclusão social dos catadores de material reciclável, a utilização de tecnologias como forma de minimizar impactos negativos dos RS e o incentivo a criação de sistemas de gestão de RS otimizados, abrangendo tratamentos de recuperação energética dos resíduos sólidos.

Nesse contexto, parece razoável o desenvolvimento de estudos que busquem otimizar a gestão integrada de resíduos sólidos das regiões do País, de forma a considerar diferentes dimensões (Ex.: econômica, ambiental e social) e, que ao mesmo tempo, estejam alinhados com os objetivos da Lei Federal nº 12.305/2010. O tema surgiu de discussões e palestras (ver anexo A) realizadas no Grupo de Estudo e Pesquisa em Infraestruturas de Transporte e Logística da Energia (GLEN), da Universidade Federal do Ceará (UFC). Nessa etapa, houve contato e relacionamento com especialistas na área e levou-se em consideração a atualidade e relevância do tema.

O município de Juazeiro do Norte foi escolhido, como região foco da pesquisa, devido à

sua grande expressividade econômica (IBGE, 2012) no Estado do Ceará (5º maior Produto Interno Bruto do Estado - PIB), à grande quantidade de RSU gerada, a inexistência de unidades de tratamento de resíduos e à disponibilidade e ao acesso facilitado à dados da Prefeitura Municipal. Oliveira (2015) enfatiza que Juazeiro do Norte produz mais de 250 toneladas por dia sendo o lixão do município o principal destino desses resíduos.

Entende-se que este trabalho ajudará no âmbito acadêmico preenchendo lacunas existentes sobre o tema e disponibilizando resultados da aplicação prática de uma abordagem de diagnóstico e de avaliação de alternativas de gestão de resíduos sólidos com base nos principais objetivos da PNRS. Da mesma forma, supõem-se que também ocorrerão benefícios para a sociedade em função das sugestões advindas do estudo que visam mitigar os impactos negativos decorrentes da problemática e potencializar resultados positivos da gestão de resíduos sólidos urbanos da Região de Juazeiro do Norte.

1.1.2 Problema de pesquisa

De acordo com Lakatos e Marconi (2001), o problema de pesquisa aponta precisamente qual a dificuldade que se espera solucionar, sob a forma de um questionamento inteiramente ligado ao tema proposto.

Desta maneira, a problemática apresentada leva à procura da definição do tema. Perante a situação apresentada, levantou-se o seguinte problema:

“Qual estrutura de enfrentamento da problemática de gestão integrada dos resíduos sólidos, em consonância com a PNRS, favoreceria a mitigação dos impactos ambientais negativos, a indústria de reciclagem, a inclusão social e produtiva de segmentos de baixa renda e a recuperação energética dos resíduos, quando aplicado ao município de Juazeiro do Norte no Ceará?”

1.1.3 Hipótese de pesquisa

A hipótese de pesquisa surge como uma suposta, provável e provisória resposta ao problema formulado. Suas principais funções são de dirigir o trabalho do pesquisador, ordenar os fatos conhecidos, resumir uma experiência, guiar a pesquisa e interpretar um conjunto de dados. (LAKATOS e MARCONI, 2001)

Seguindo este raciocínio, a seguinte hipótese de pesquisa foi levantada: “Considerando o atual estágio e qualidade de gestão integrada dos RSU no Município de Juazeiro do Norte, um diagnóstico e decorrentes proposições advindas de uma metodologia sistêmica irá gerar significativos benefícios socioeconômicos e ambientais consonantes com o que reza a PNRS”

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA

A finalidade das questões de pesquisa é facilitar o entendimento e proporcionar a realização das atividades de pesquisa, através da decomposição do problema. Bastos (2008) afirma que o problema de pesquisa suscita várias questões do ponto de vista teórico e prático.

Nesta pesquisa, essas questões foram agrupadas em questões do ponto de vista teórico e questões do ponto de vista prático.

1.2.1 Questões de pesquisa – Ponto de vista teórico

- Qual a importância e características da gestão integrada dos resíduos sólidos em uma cidade de médio porte? Como essa gestão pode ser planejada? Quais são as principais definições da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS?
- Como se pode empregar a análise sistêmica, o método multicritério de apoio à decisão e as bem-sucedidas técnicas de tratamento de resíduos para auxiliar no diagnóstico e na proposição de soluções para a referida gestão integrada?

1.2.2 Questões de pesquisa – Ponto de vista prático

- Qual é a atual situação do sistema de gestão dos resíduos sólidos do Município de Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará? Com base na PNRS, quais são seus principais problemas?
- Quais são os possíveis impactos futuros da problemática do sistema no Município de Juazeiro do Norte caso haja intervenções (refletidas em diferentes cenários) ou caso nada seja feito?
- Qual estrutura possível e viável de gestão de resíduos sólidos urbanos - de acordo com a PNRS e baseado na abordagem sistêmica, no método de apoio à decisão e nas boas

práticas de tratamento de RS pode ser sugerida para implantação no Município de Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará, em face nos problemas nele detectados?

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos definem, resumidamente, o intuito do trabalho. Dependendo da relevância do trabalho, os objetivos podem ser subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos, dos pontos de vista teórico e prático (BASTOS, 2008).

Seguindo esta prática, os objetivos foram divididos em geral e específicos. O objetivo geral define o propósito maior da pesquisa e tem ligação essencial ao problema de pesquisa. Já os objetivos específicos buscam detalhar e são compartimentações do objetivo geral. Para uma melhor organização, subdividiu-se os objetivos específicos em dois novos subgrupos: do ponto de vista teórico e prático.

1.3.1 Objetivo geral

Diagnosticar e propor soluções para a gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos do Município de Juazeiro do Norte, de acordo com a PNRS e com base em uma abordagem metodológica calcada em conceitos da análise de sistemas, do método de apoio à decisão e das boas práticas de gestão enfocando diferentes unidades de tratamento de resíduos.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Do ponto de vista teórico

- Explicar como funciona a abordagem sistêmica no trato da problemática de sistemas de gestão de resíduos sólidos;
- Realçar a importância das boas práticas da gestão/gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil e no Mundo, com ênfase para aos diferentes tipos de tratamentos existentes;
- Elaborar uma abordagem de avaliação de alternativas para a solução de problemas do sistema de resíduos sólidos considerando também os conceitos de métodos de apoio à decisão.

b) Do ponto de vista prático

- Aplicar a abordagem metodológica proposta ao atual sistema de gestão dos resíduos sólidos urbanos no Município de Juazeiro do Norte, no Estado do Ceará;
- Conceber, avaliar e comparar cenários futuros de possíveis impactos vinculados às proposições elencadas para a problemática em estudo.
- Contribuir com proposições para que o sistema de gestão dos resíduos sólidos do Município de Juazeiro do Norte se adeque a Lei Federal 12.305/10;

1.4 METODOLOGIA

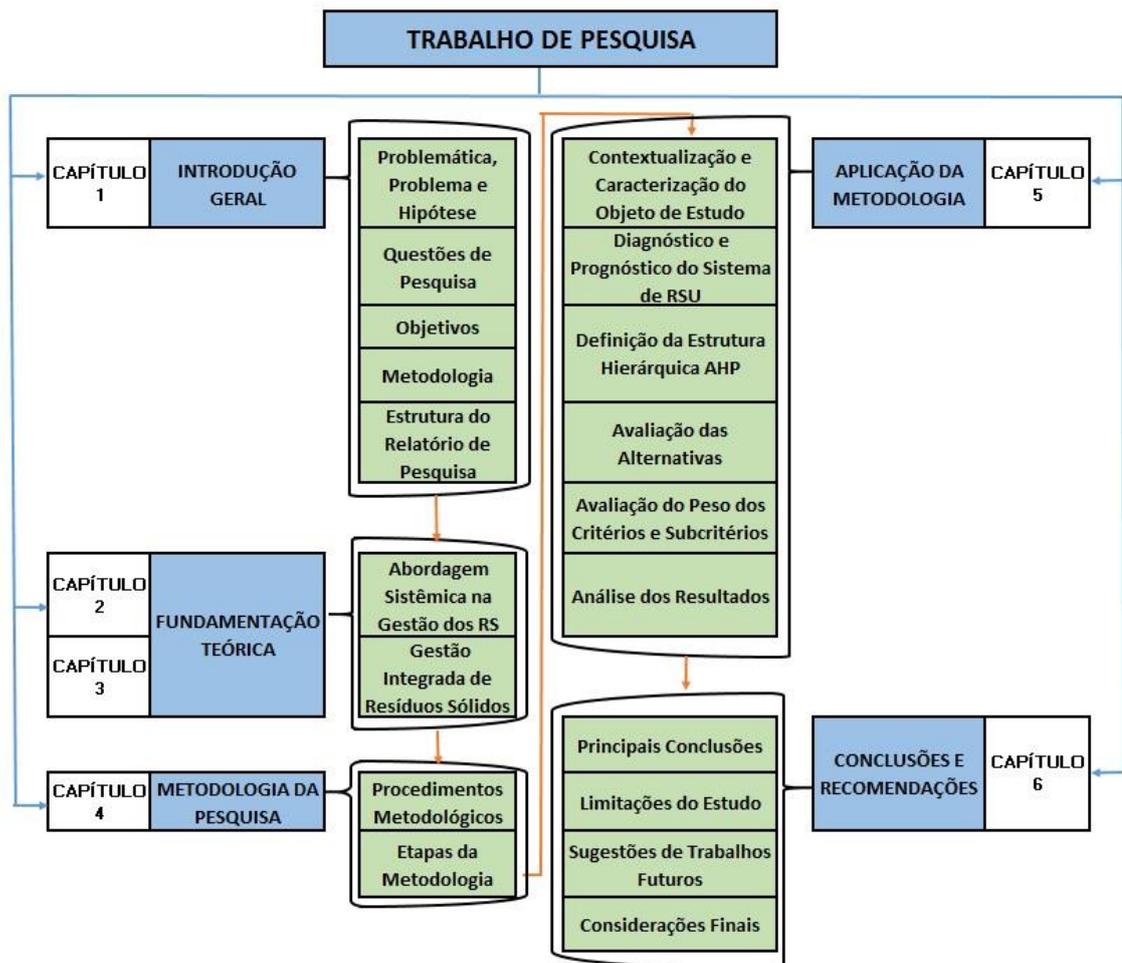
Em relação à sua classificação, a pesquisa é definida como aplicada, quali-quantitativa e exploratória baseada em procedimentos técnicos de pesquisa bibliográfica e levantamento de campo, envolvendo aplicação de questionário, com foco em um caso específico.

O Capítulo IV detalha a metodologia da pesquisa através da descrição dos procedimentos metodológicos (classificação da pesquisa e levantamento de dados e informações) e das etapas da metodologia usada.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

A estrutura da pesquisa está dividida em Introdução Geral, Fundamentação Teórica, Metodologia da Pesquisa, Aplicação da Metodologia e Conclusões e Recomendações.

Figura 1: Estrutura da Pesquisa



Fonte: Elaborada pelo Autor

O Capítulo 1, como visto, contextualiza o ambiente do trabalho ao leitor através da exposição da problemática, do problema e hipótese de pesquisa, das questões abordadas, dos objetivos almejados (geral e específicos), da metodologia e da estrutura do trabalho de pesquisa.

A fundamentação teórica estuda teorias essenciais para o sucesso do estudo e é composta pelos capítulos 2 e 3. No Capítulo 2 é realizada uma revisão teórica do tema “Abordagem sistêmica na gestão de resíduos sólidos”, explicitando-se conceitos e métodos de análise de sistemas e de apoio a tomada de decisão (Ex.: AHP) em especial no trato da problemática do

sistema de gestão de resíduos sólidos. O Capítulo 3, “Gestão de resíduos sólidos”, cita definições básicas do sistema, revisa a teoria da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal 12.305) e apresenta as boas práticas no tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil e no Mundo.

Em seguida, na metodologia da pesquisa (Capítulo 4), são detalhados os procedimentos metodológicos (classificação da pesquisa, população, amostragem, coleta de dados e tabulação/análise de dados) e as etapas da metodologia utilizada.

O Capítulo 5 aplica todas as etapas da metodologia e tem como principais produtos o diagnóstico da atual gestão de RSU e a proposição de uma alternativa ideal para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte.

Finalmente, no Capítulo 6 encontram-se as conclusões e as recomendações. Nele ressaltam-se as principais conclusões, explicita-se as limitações do estudo, sugere-se trabalhos futuros para aprofundamento do assunto e apresenta-se as considerações finais.

2 ABORDAGEM SISTÊMICA NA GESTÃO DOS RS

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica de abordagem sistêmica com foco na gestão de RS. Nele é realizada uma revisão teórica sobre o assunto destacando os principais conceitos de sistema, as interações com outros sistemas e com o meio em que está inserido e as diferentes classificações de sistemas. Em seguida, são apresentados métodos e ferramentas de análise de sistemas que podem auxiliar na proposição de soluções para os sistemas de gestão de resíduos sólidos. Por fim, são destacadas as considerações gerais do capítulo.

2.1 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS DE SISTEMAS

Na literatura existem várias definições de sistemas e na sua grande maioria há o consenso de que um sistema é um conjunto de entidades inter-relacionadas que criam um todo. Em uma dessas definições, Athey (1982) afirma que os sistemas são formados por vários componentes (subsistemas) que, em interação mútua, buscam alcançar um objetivo.

Para um bom entendimento do funcionamento dos sistemas, é necessário que seja conceituado alguns elementos básicos dos sistemas. Estes conceitos são:

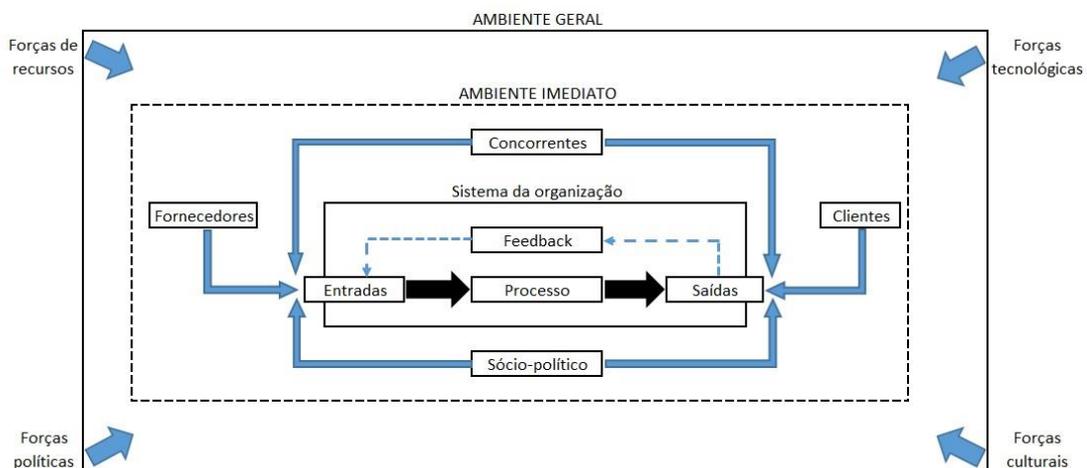
- Entradas (*Inputs*) – São os recursos necessários para que o sistema funcione. Exemplos: pessoas, máquinas, energia, dinheiro, conhecimento (normas/boas práticas), entre outros.
- Processo – realiza o processamento/transformação das entradas a fim de gerar resultados desejados.
- Saídas (*Outputs*) – são os resultados da etapa de processamento. Exemplos: Bens, serviços, entre outros.
- Realimentação (*Feedback*) – são respostas que servem para avaliar os resultados alcançados.
- Limites/Fronteiras do sistema – englobam todos os componentes que são influenciados ou controlados diretamente pelo sistema.
- Ambiente – compreende os fatores que não são controlados pelo sistema, no entanto influenciam seu rendimento.

Bertalanffy (1968) ressalta que os sistemas interagem entre si, influenciando e sendo influenciados por outros sistemas do ambiente. A Figura 2 ilustra a visão de Athey (1982) em

relação aos atores e fatores ambientais atuantes sobre um sistema organizacional e suas interações. O sistema da organização é composto por vários subsistemas e possui os elementos de entrada, processo, saída e *feedback*; através desses elementos e do funcionamento dos seus subsistemas, a organização gera e dispõe o produto ou serviço que supre a necessidade do cliente.

No entanto, o sistema organizacional está inserido e sofre influências do seu ambiente imediato e do ambiente geral. O ambiente imediato engloba também os fornecedores, os concorrentes, os clientes e o sistema sócio-político. As mudanças criadas por estes quatro fatores ocasionam um efeito direto e imediato sobre o sistema da organização; os fornecedores influenciam nas entradas do sistema e os clientes atuam nas suas saídas; já os concorrentes e os fatores sócio-políticos intervêm tanto nas entradas quanto nas saídas do sistema. Por fim, o ambiente geral (mais amplo) age de forma lenta sobre o sistema organizacional; suas influências originam-se indiretamente das forças de recursos de produção (matéria-prima e mão de obra, dentre outros), das forças políticas, das forças culturais e das forças tecnológicas.

Figura 2: Atores/Fatores atuantes em um sistema organizacional

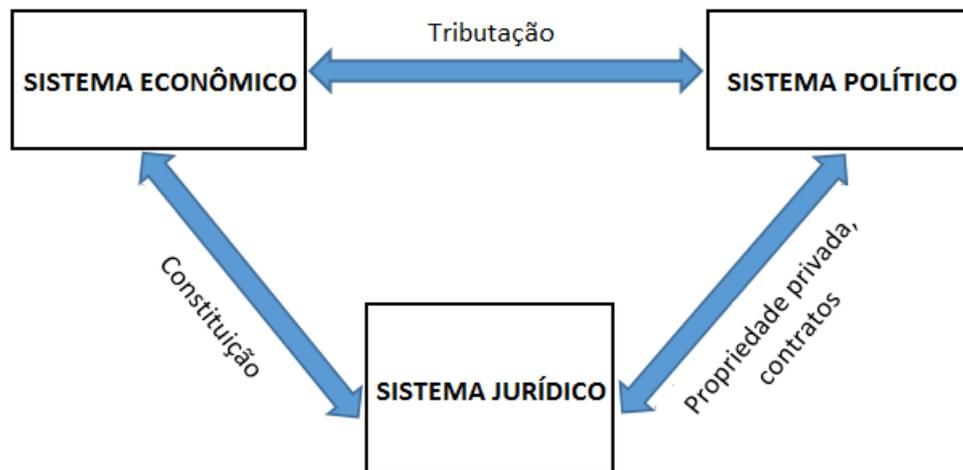


Fonte: Athey (1982), modificado pelo autor

A descrição de sistema deixa claro a constante necessidade de comunicação, o que destaca sua importância para os sistemas. Luhmann (2012) explica a comunicação entre o sistema e o ambiente ou outros sistemas por intermédio do conceito de acoplamento estrutural, derivado dos estudos da biologia de Maturana e Varela (1980). Luhmann (2012) define acoplamento estrutural como sendo o meio pelo qual o sistema/sistema ou sistema/ambiente interagem entre si (há comunicação). Por exemplo, a tributação é um acoplamento estrutural entre os sistemas político e econômico.

A Figura 3 mostra exemplos de acoplamentos estruturais entre os sistemas político, econômico e jurídico.

Figura 3: Acoplamento estrutural entre sistemas



Fonte: Elaborada pelo autor

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS

Deve-se enfatizar que existem diferentes tipos de sistemas; nem todos são notadamente sensíveis aos efeitos do ambiente e, além disso, os sistemas diferem entre si pelo seu grau de controle interno e pelo nível de adaptabilidade de suas metas (ATHEY, 1982). Este autor afirma que, de acordo com estas três características, os sistemas podem ser classificados em Estático, Dinâmico, Homeostático ou Cibernético.

O Quadro 1 aponta se o sistema possui ou não as características de sensibilidade ao ambiente, controle interno e adaptabilidade das metas. É possível visualizar que os sistemas estáticos não são sensíveis aos efeitos ambientais, suas metas são inalteráveis e não há como garantir que elas sejam atingidas devido à inexistência de controles internos. Similarmente aos estáticos, os sistemas dinâmicos dispõem de metas fixas e não possuem controles internos que garantam o atendimento das metas; entretanto, são abertos aos efeitos do ambiente. Já os homeostáticos diferem dos dinâmicos somente pelo fato de apresentar controle interno de *feedback*. Por fim, os sistemas cibernéticos são opostos aos estáticos; eles são sensíveis aos efeitos do ambiente e têm metas adaptáveis e controle interno.

Quadro 1: Classificação dos sistemas

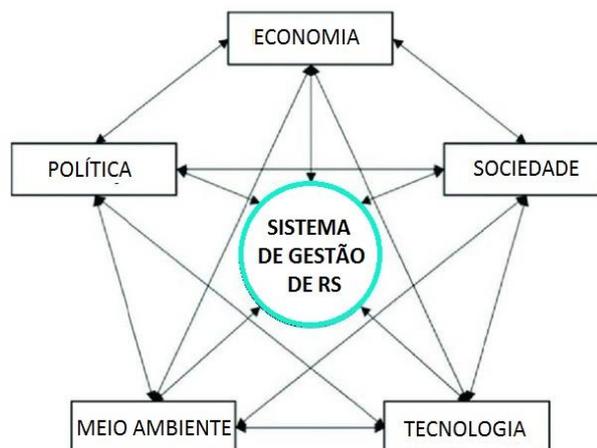
SISTEMA	SENSIBILIDADE AO AMBIENTE	CONTROLE INTERNO	ADAPTABILIDADE DAS METAS
Estático	-	-	-
Dinâmico	x	-	-
Homeostático	x	x	-
Cibernético	x	x	x

Fonte: Elaborado pelo Autor

Outra classificação bastante recorrente na literatura da área é a divisão entre sistemas abertos (possuem sensibilidade ao ambiente) e fechados (não possuem sensibilidade ao ambiente). Chang e Pires (2015) afirmam que os sistemas de gestão de resíduos sólidos são sistemas abertos complexos que frequentemente trocam informações, materiais e energia com o ambiente externo e outros sistemas.

A Figura 4 reflete a complexidade das interações dos sistemas de gestão de RS. A política, a economia, a sociedade, a tecnologia e o meio ambiente interagem com o sistema de gestão de RS e, ao mesmo tempo, entre si, gerando um ambiente inconstante e de difícil planejamento e controle dos resultados.

Figura 4: As complexas interações nos sistemas de gestão de RS



Fonte: Chang e Pires (2015), modificado pelo autor

2.3 ANÁLISE DE SISTEMAS E TÉCNICAS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

A criação e utilização de métodos e técnicas de análise de sistemas ajudam na simplificação do sistema de gestão de RS facilitando a busca por soluções (CHANG e PIRES, 2015; MARSHALL E FARAHBAKHS, 2013).

2.3.1 Abordagem de solução de problemas

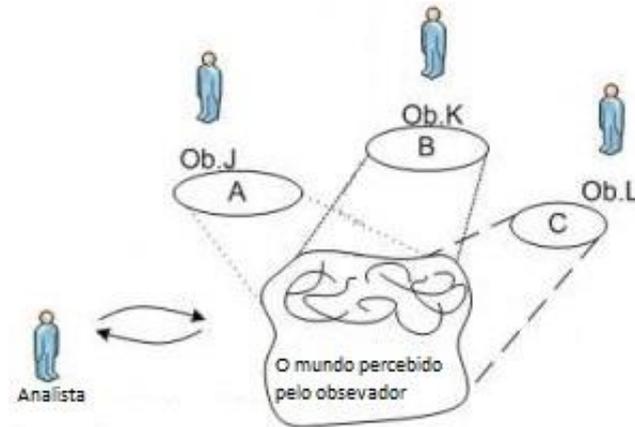
As abordagens de solução de problemas ajudam no desenvolvimento de soluções através de metodologias, métodos e técnicas que organizam e orientam o passo a passo necessário para alcançar os objetivos desejados. Neste contexto, Wastell (2012) aponta Peter Checkland como um dos estudiosos mais bem-conceituados entre vários que desenvolveram boas práticas para solução de problemas.

Peter Checkland (1981) desenvolveu uma metodologia sistêmica de solução de problemas chamada de Metodologia de Sistemas Suaves (*Soft Systems Methodology – SSM*). Essa metodologia aborda situações não estruturadas onde o mundo real é complexo, confuso e há diferentes interpretações dos problemas existentes e dos objetivos desejáveis. Nesse contexto, o analista deve considerar as diversas visões dos grupos de observadores para entender a problemática como um todo (ver Figura 5).

Checkland e Poulter (2006) afirmam que a SSM tem como objetivo tratar essas situações definidas como problemáticas, através de etapas que organizam o pensamento tornando possível que o analista defina ações para a melhoria do cenário atual.

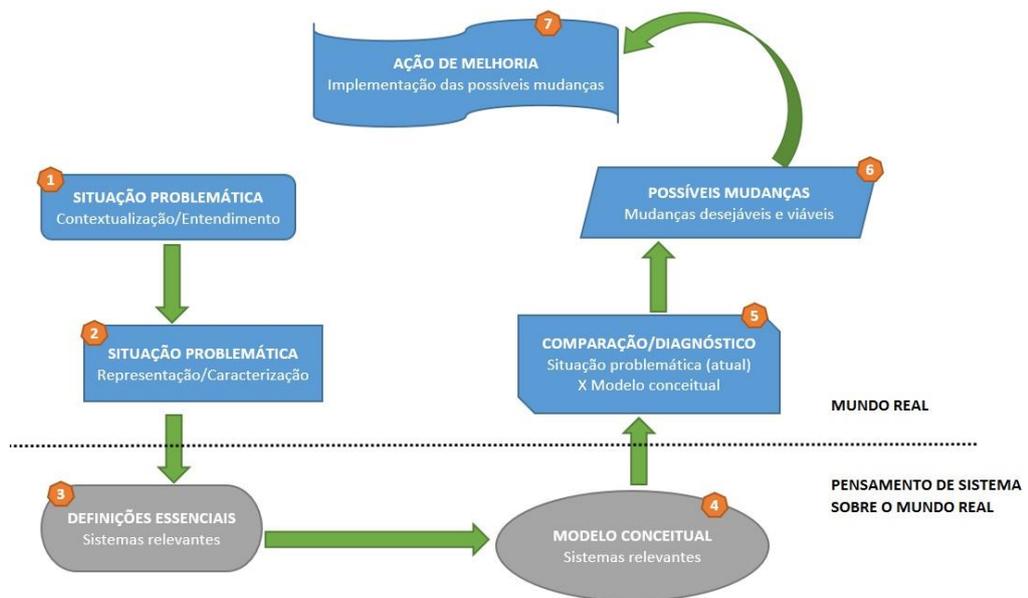
Como mostra a Figura 6, o modelo convencional da SSM possui os passos “Situação Problemática (Contextualização/Entendimento)”, “Situação Problemática (Representação/Caracterização)”, “Definições Essenciais”, “Modelo Conceitual”, “Comparação/Diagnóstico”, “Possíveis Mudanças” e “Ação de Melhoria”.

Figura 5: Situação não estruturada



Fonte: Sistemigramas (2009), modificado pelo autor

Figura 6: Modelo convencional SSM em 7 passos



Fonte: Checkland (1981), modificado pelo autor

A seguir detalha-se cada um destes 7 passos (CHECKLAND, 1981):

1. Situação problemática (contextualização/entendimento) - nesta etapa é realizada a contextualização do sistema estudado a fim de entender seu funcionamento, suas interações e sua situação atual. Para alcançar este objetivo, deve-se identificar os subsistemas, sistemas e ambientes envolvidos, assim como os problemas atuais evidenciados por diferentes perspectivas. Nessa fase é necessário buscar informações de diferentes partes interessadas da situação;

2. Situação problemática (representação/caracterização) - a etapa 2 é responsável pela representação da situação problemática através de um esquema. Normalmente utiliza-se de ferramentas ilustrativas para otimizar a visualização da situação atual;

3. Definições essenciais (sistemas relevantes) - neste momento são descritas as definições e propósitos essenciais dos sistemas considerados relevantes; para isto, deve-se, primeiramente, definir um sistema relacionado que seja fundamental à situação. Checkland (1981) desenvolveu uma ferramenta chamada de CATWOE que ajuda na conclusão desta etapa. Esta ferramenta realiza as definições essenciais, levantando as partes prejudicadas ou beneficiadas pela transformação do processo do sistema (C - clientes), os encarregados pelo processo de transformação das entradas em saídas (A - atores), o processo de transformação do sistema (T - processo de transformação), a interpretação de mundo que faz com que T tenha significado no ambiente (W - visão de mundo), as partes que podem intervir no processo de transformação (O - proprietários) e as restrições criadas pelo ambiente do sistema (E - limitações ambientais);

4. Modelo conceitual (sistemas relevantes) - o passo 4 define um modelo conceitual que englobe objetivos e princípios necessários para que o sistema funcione de acordo com as definições essenciais;

5. Comparação/diagnóstico (situação problemática x modelo conceitual) - esta etapa é responsável pelo diagnóstico da situação atual. É realizada a comparação entre a situação problemática (atual), criada na etapa 2, e o modelo conceitual, definido na etapa anterior. Ao final, tem-se uma visão ampla dos problemas atuais, indicando onde se deve analisar as possíveis mudanças;

6. Possíveis mudanças (mudanças desejáveis e viáveis) - nesta fase são analisadas e selecionadas possíveis mudanças no sistema, baseando-se na comparação realizada na etapa anterior. É necessário que seja verificado de forma sistêmica se a modificação resultará em melhorias desejáveis ao sistema e se são viáveis de serem implantadas no seu ambiente;

7. Ação de melhoria – implementação da mudança escolhida - etapa 7 implementa as ações definidas anteriormente que visam otimizar a problemática do sistema através da diminuição ou anulação dos problemas.

2.3.2 Métodos de Apoio à Decisão

Chang e Pires (2015) aconselham que, no processo de planejamento, antes de se propor mudanças no sistema de gestão de RS, sejam utilizados métodos de apoio à decisão que considerem diversos fatores técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

Karmperis *et al.* (2013) afirmam que a maioria dos métodos de apoio à decisão aplicados na gestão de RS são desenvolvidos a partir dos modelos Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Analysis - LCA), Análise Custo-Benefício (Cost Benefit Analysis - CBA) e Método Multicritério de Apoio à Decisão (Multi Criteria Decision Making - MCDM).

a) Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)

A avaliação do ciclo de vida é um método que avalia os impactos ambientais dos produtos durante seu ciclo de vida (ver Figura 7), ou seja, desde as atividades de desenvolvimento/materiais até a disposição final (KARMPERIS *et al.*, 2013).

A LCA é dividida nas etapas de definição de objetivo e escopo, levantamento de dados do ciclo de vida do produto (quantidade de recursos, fluxos de resíduos e emissão de poluentes), avaliação dos impactos do ciclo de vida do produto e interpretação dos resultados (REBITZER *et al.*, 2004).



Fonte: Chang e Pires (2015), modificado pelo autor

Os principais pontos fortes da LCA, quando aplicada nos sistemas de gestão de RS, são

as possibilidades de quantificar todas as emissões de poluentes ao solo, à água e ao ar bem como de estimar e avaliar todos os efeitos do consumo de materiais nos seres humanos e ecossistemas. Por outro lado, alguns pontos fracos do método são o grande tempo necessário para desenvolver um modelo LCA abrangente e as premissas assumidas no método, que podem ser subjetivas ou arbitrárias (KARMPERIS *et al.*, 2012).

De acordo com Chang e Pires (2015), a LCA pode ser utilizada na gestão dos RS com dois propósitos: i) Analisar o final do ciclo de vida de um produto e avaliar os impactos e benefícios ambientais gerados pela reutilização, reciclagem, recuperação ou eliminação de unidades de destinação existentes; ou ii) avaliar o serviço de gestão de RS realizado por uma empresa privada ou pelo governo.

b) Análise Custo-Benefício (CBA)

A Análise Custo-Benefício é um método que avalia quantitativamente os custos e benefícios de impactos ao projeto (ALMANSA E MARTINEZ-PAZ, 2011).

O guia para análise custo-benefício de investimentos em projetos, criado pela Comissão Europeia (EC, 2008), sugere os seguintes seis passos para aplicar o método CBA: (i) Exposição e discussão da conjuntura socioeconômica e dos objetivos; (ii) Descrição do projeto; (iii) Estudo da viabilidade do projeto e de alternativas; (iv) Análise financeira; (v) Análise econômica; e (vi) Avaliação de risco.

Alguns dos pontos fortes da CBA são: i) levar em conta impactos diretos e indiretos sobre o projeto; e ii) lidar de forma eficiente com as incertezas do projeto através da avaliação de risco. Já os principais pontos fracos do método, particularmente quando aplicados aos sistemas de gestão de RS, são: i) a grande dificuldade em mensurar os benefícios e custos do projeto em relação aos impactos nos ecossistemas; e ii) o grande tempo necessário para desenvolver um modelo CBA abrangente (KARMPERIS *et al.*, 2013).

É possível constatar que, no decorrer dos anos, a CBA foi utilizada em pesquisas para avaliar alternativas de gestão de resíduos sólidos (DEWEES E HARE, 1998; DIAS, 2006; AYE E WIDJAYA, 2006; LAVÉE, 2010). Apesar disso, Chang e Pires (2015) afirmam que custos e benefícios indiretos, julgados fatores importantes, são dificilmente considerados no sistema.

c) Método Multicritério de Apoio à Decisão (MCDM)

De acordo com Karmperis *et al.* (2013), os modelos MCDM consistem basicamente em

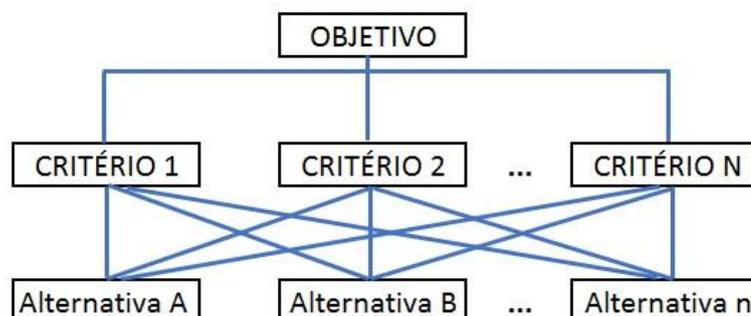
processos com passos específicos que podem considerar diversos critérios e auxiliam os tomadores de decisão a avaliar diferentes alternativas de solução de problemas. Ao analisar especificamente o sistema de gestão de RS, é possível constatar vários estudos que utilizaram métodos multicritério de apoio à decisão (CHANG e PIRES, 2015; HOKKANEN e SALMINEN, 1997; SOLTANI *et al.*, 2015; YAP E NIXON, 2015).

Os principais pontos fortes do método MCDM, quando aplicado no sistema de gestão de RS, são as possibilidades de incluir formalmente no processo de planejamento diversos critérios conflitantes (KOU *et al.*, 2011) e de usar critérios quantitativos e qualitativos para avaliar alternativas (LINKOV *et al.*, 2006). Em contrapartida, são poucos os modelos que consideram o impacto dos riscos das alternativas (KARMPERIS *et al.*, 2012) e os modelos avaliam somente as alternativas de solução, não fornecendo informações para minimizar ou prevenir a geração de resíduos (MORRISSEY e BROWNE, 2004).

O Processo Analítico Hierárquico (AHP), o PROMETHEE, o ELECTRE e a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) são tipos de MCDM bastante utilizados em estudos da área (KARMPERIS *et al.*, 2013; CHANG E PIRES, 2015; SOLTANI *et al.*, 2015). Entretanto, o AHP é o método que mais se destaca na gestão de RSU. Soltani *et al.* (2015) afirmam que um estudo constatou que o método AHP foi usado em 65% dos artigos científicos publicados sobre tomada de decisão na área de gestão de resíduos sólidos urbanos.

Segundo Yap e Nixon (2015), o AHP decompõe um problema complexo em níveis hierárquicos, permite avaliar e apontar a melhor alternativa para o alcance de um objetivo geral através de diferentes critérios com importância ponderada (ver Figura 8).

Figura 8: Estrutura hierárquica simples AHP



Fonte: Saaty (1990), modificado pelo autor

Saaty (1980) divide o método AHP em seis etapas:

- i) Definição do objetivo geral - o objetivo deve ser definido de forma clara para determinar o contexto da decisão;
- ii) Definição das alternativas - as alternativas devem ser factíveis para o sistema em estudo;
- iii) Definição dos critérios e/ou subcritérios relevantes para alcançar o objetivo – Chang e Pires (2015) apontam os critérios técnico, regulatório, econômico, ambiental e social como os mais importantes para avaliar os sistemas de gestão de RS;
- iv) Avaliação das alternativas em relação aos critérios – todas as alternativas são avaliadas par a par em relação a cada critério. Chang e Pires (2015) citam a aplicação de questionários a especialistas como um meio de realizar a avaliação. Outro meio que pode ser utilizado, em situações com disponibilidade de dados, é o tratamento direto através de técnicas estatísticas básicas (como a que utiliza a mediana);
- v) Avaliação da importância relativa de cada critério – os critérios possuem diferentes graus de importância para os tomadores de decisões; logo, para o alcance mais eficiente do objetivo geral, é necessário ponderar a relevância de cada um. Assim como na etapa 4, pode-se aplicar questionários a especialistas da área e, para auxiliar na ponderação, deve-se utilizar uma escala de comparação (ver Quadro 2); e
- vi) Determinação da avaliação global de cada alternativa – existem inúmeros softwares que facilitam a avaliação global de cada alternativa. Por exemplo: *Decision Lab 2000*[®], *Criterium Decision Plus*[®], *Expert Choice*[®] e *SuperDecisions*[®] (MORRISSEY E BROWNE, 2004; WEISTROFFER *et al.*, 2005; YAP E NIXON, 2015).

Quadro 2: Escala fundamental de Saaty para comparar duas alternativas

1	Igual Importância	As duas opções contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena	Uma opção contribui levemente mais em relação à outra.
5	Importância Grande	Uma opção contribui fortemente mais em relação à outra.
7	Importância Muito Grande	Uma opção contribui muito fortemente mais em relação à outra.
9	Importância Absoluta	Uma opção contribui com o maior grau de certeza em relação à outra.
2, 4, 6, 8;	Valores Intermediários	Quando se procura um grau de contribuição intermediário

Fonte: Saaty (1980), modificado pelo autor

d) Método Delphi

O método Delphi é comumente utilizado em conjunto com a AHP em estudos dos sistemas de resíduos sólidos (SILVA, 2012; D'ALOIA, 2011). Segundo Wright e Giovinazzo (2000), a Delphi aplica um questionário a um grupo de especialistas para julgar pontos específicos, com base em seus conhecimentos e experiências, ajudando, assim, nos processos de decisão.

Na aplicação do método, os especialistas respondem a um questionário com respostas quantitativas, de forma individual e anônima. As respostas recebem tratamento estatístico simples (utilizando-se, por exemplo, a mediana) e são devolvidas para que os participantes analisem e refaçam sua resposta até que entrem em consenso (variação menor que 10%) com as diferentes opiniões (WRIGHT E GIOVINAZZO, 2000).

2.3.3 Critérios de sustentabilidade

Existem diversos critérios que podem ser usados com o intuito de avaliar alternativas para o sistema de gestão de RS. No entanto, quanto maior o número de critérios, maior é a complexidade do estudo. A maioria dos critérios de avaliação são divididos em cinco categorias

que representam os pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental, social, técnico e regulatório (CHANG E PIRES, 2015).

- Critério econômico

Os critérios econômicos estão relacionados com os custos e receitas das opções de gestão de resíduos; entre eles destacam-se os critérios *Custos de Implantação*, *Custos de Operação & Manutenção* e *Receita Operacional*. O critério *Custos de Implantação* inclui gastos com infraestrutura e bens de capital. Já o critério *Custos de Operação & Manutenção* compreende os salários dos funcionários, o consumo de materiais e serviços de manutenção. O critério *Receita Operacional* avalia os ganhos dos produtos resultantes do sistema de gestão de RS, tais como materiais recicláveis, fertilizantes e energia elétrica (CHAG E PIRES, 2015).

- Critério ambiental

O critério ambiental considera as emissões de poluentes, os riscos ambientais e outros fatores relacionados com o meio ambiente. O critério ambiental de Emissão Atmosférica avalia poluentes específicos emitidos por uma determinada alternativa (CHANG E PIRES, 2015). Segundo Turner, Kemp e Williams (2011) as emissões de gás carbônico (CO₂) e gás metano (CH₄) são responsáveis por 90% do total de gases de efeito estufa (GEE) gerados pelos resíduos.

Outro critério ambiental é o Volume de Ocupação do Aterro que, segundo Herva e Roca (2013), determina a capacidade de uma alternativa reduzir o volume de resíduos dispostos em aterros.

- Critério social

De acordo com Chang e Pires (2015), os critérios sociais abordam aspectos relacionados ao trabalho, bem-estar e aceitação da população. Emprego é um critério social que considera o número de postos de trabalho criados pela alternativa de sistema de gestão de resíduos sólidos (ROUSSAT *et al.*, 2009).

- Critério técnico

Os critérios técnicos consideram a capacidade de produção, a existência de recursos, a adaptabilidade às condições locais, a maturidade da tecnologia usada e outras características específicas das alternativas. O critério Viabilidade mensura a possibilidade de sucesso de uma determinada alternativa (SU *et al.*, 2007).

- Critério regulatório

O critério regulatório analisa se as alternativas estão de acordo com requisitos legais podendo julgar a harmonização com pressupostos regulatórios globais, regionais, nacionais e locais. Um exemplo é o critério Aplicação das Prioridades da Legislação que avalia o grau de conformidade da alternativa com as prioridades da lei em vigor (CHANG E PIRES, 2015).

2.3.4 Modelos de projeção

Chang e Pires (2015) destacam a importância de modelos matemáticos de projeção na previsão de condições futuras e na avaliação de possíveis problemas no sistema de gestão de RS. De acordo com Younes *et al* (2015), as ferramentas/técnicas de projeção podem ser qualitativas ou quantitativas. As qualitativas utilizam a opinião de especialistas e/ou o julgamento pessoal; já as quantitativas são baseadas em modelos matemáticos. Alguns exemplos de modelos quantitativos são:

- **Modelo de estimativa de área ocupada por aterro**

Esta técnica estima a área ocupada por aterros ou lixões (disposição final). Segundo Younes *et al* (2015), o espaço ocupado pelos RSU dispostos em aterro/lixões pode ser estimado através da fórmula:

$$\text{Área} = R \times L \times \text{Pop} \times 1,5 / (\rho_{\text{bulk}} \times H) \quad (1)$$

onde R é taxa de geração *per capita* por ano de RSU (kg/hab/ano), L é o tempo de utilização do aterro/lixão (anos), Pop é quantidade total de pessoas, ρ_{bulk} é a densidade dos resíduos (kg/m³) e H é a altura das montanhas de resíduos no aterro (m).

- **Modelo de estimativa de geração de CH₄ e CO₂ em aterro**

Esta técnica estima a quantidade de gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) produzido pelos RSU dispostos em aterros. Segundo Turner *et al.* (2011), as emissões de CO₂ e CH₄ são responsáveis por 90% do total de gases de efeito estufa gerados pelos resíduos. A ferramenta *LandGEM*, criada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), é comumente usada em estudos de previsão de produção de gases a partir de RSU (CHO *et al.*, 2012; KARANJEKAR *et al.*, 2015).

Para seu cálculo, é necessário inserir na planilha do *Landgem* os valores de i , n , K , L_o , NMOC, volume de metano e M_i . Onde i é o ano de início e n o ano de término do funcionamento do aterro; K é a taxa de geração de metano; L_o é a capacidade potencial de geração de metano; a concentração de compostos orgânicos voláteis não-metânicos (NMOC em ppmv hexano); volume de metano (em %) e M_i a quantidade de RSU que entra no aterro ou lixão todo ano.

- **Modelo de estimativa da energia elétrica gerada a partir do tratamento de RSU em incineradores**

Segundo Silva (2015), este modelo calcula a quantidade da energia elétrica produzida por usinas de incineração de resíduos sólido urbanos utilizando as fórmulas 2 e 3.

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times M_i(t) \times PCI \quad (2)$$

$$\text{Ener.} = P_{inc} \times \text{Horas ano} \times \text{FC} \quad (3)$$

onde a potência elétrica P_{inc} [Mw] é calculada a partir dos valores da eficiência do ciclo a vapor (η_v), da eficiência do gerador elétrico (η_g), da taxa de incineração de RSU ($M_i(t)$) - em Kg/s - e do poder calorífico inferior do RSU da entrada da caldeira (PCI) - em Mj/Kg. A energia elétrica é estimada ao multiplicar a potência elétrica (P_{inc}) pela quantidade de horas operadas no ano, levando em consideração o percentual de tempo em um ano em que o equipamento está produzindo eletricidade em capacidade plena (FC).

- **Modelo de estimativa da energia elétrica gerada a partir do tratamento de RSU em biodigestores anaeróbicos**

Silva (2015) afirma que a energia elétrica, gerada a partir da queima do gás metano produzido em biodigestores anaeróbicos, pode ser estimada através das fórmulas (4) e (5).

$$P_{\text{digest.}} = \eta_m \times \eta_g \times PCI_{\text{CH}_4} \times R_B(t) \quad (4)$$

$$\text{Ener.} = P_{\text{digest.}} \times \text{Horas ano} \times \text{FC} \quad (5)$$

A fórmula (4) calcula a potência gerada pelo gás metano produzido em biodigestores anaeróbicos ($P_{\text{digest.}}$) e, para isto, são utilizados os parâmetros de eficiência térmica dos motores de combustão interna (η_m), eficiência do gerador elétrico (η_g), poder calorífico inferior do gás metano (PCI_{CH_4}) – em MJ/m^3 - e a taxa de produção de metano ($R_B(t)$) - em m^3/s . Já a fórmula (5) estima a energia elétrica ao multiplicar a potência elétrica ($P_{\text{digest.}}$) pela quantidade de horas operadas no ano, levando em consideração o percentual de tempo em um ano em que o equipamento está produzindo eletricidade em capacidade plena (FC).

2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O capítulo 02 atingiu os objetivos específicos de explicar como funciona a abordagem sistêmica, em especial no trato da problemática de sistemas de gestão de resíduos sólidos, e de ajudar na elaboração da abordagem de avaliação de alternativas utilizada no estudo.

Os sistemas de gestão de resíduos sólidos são sistemas abertos complexos que frequentemente trocam informações, materiais e energia com o ambiente externo e outros sistemas. Julga-se essencial a utilização de uma abordagem sistêmica considerando seus conceitos básicos, métodos e técnicas no planejamento de soluções para esses tipos de sistemas.

Existem na bibliografia diversos métodos e técnicas de análise de sistemas. Entre eles destacam-se: a metodologia SSM, a avaliação de ciclo de vida, a análise custo-benefício, os métodos multicritérios de apoio a decisão, os critérios de avaliação e técnicas de projeção qualitativas e quantitativas.

O seguinte trabalho utilizou a metodologia SSM, o método multicritério AHP, critérios de sustentabilidade de Chang e Pires (2015) e diversos modelos matemáticos de projeção para criar a abordagem sistêmica aplicada no capítulo 05.

3 GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica da gestão de resíduos sólidos. Primeiramente, há uma breve introdução do assunto, onde são apresentadas a evolução da gestão dos RS e algumas definições fundamentais. Após, é apresentada a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Lei 12.305/10) com ênfase na sua função, suas prioridades e seus objetivos. Por fim, são expostas as boas práticas de gestão de RS presentes no Brasil e no mundo com foco no tratamento dos resíduos sólidos urbanos e apresentadas as considerações gerais do capítulo.

3.1 EVOLUÇÃO DA GESTÃO INTEGRADA DE RS

Desde sempre, os seres humanos produziram resíduos e, com o passar dos anos, a quantidade gerada cresceu cada vez mais. O aumento dos efeitos negativos trazidos pelos resíduos fez com que surgisse o serviço público de gestão de resíduos em diversas regiões. Primeiramente, as questões higiênicas e de saúde pública eram as prioridades estratégicas e se limitavam às ações de coleta e despejo dos resíduos em lugares mais distantes (WILSON, 2007; BRUNNER e RECHBERGER, 2015).

A partir dos anos 1970, o foco estratégico da gestão dos resíduos começou a mudar. Questões ambientais surgiram e se tornaram prioridade em agendas políticas de diversos países (WILSON, 2007). As conferências da Organização das Nações Unidas (ONU), na cidade de Estocolmo em 1972, e na cidade do Rio de Janeiro em 1992, foram marcos na busca de um desenvolvimento sustentável. A segunda conferência citada definiu um conjunto de 27 princípios de desenvolvimento sustentável com base na integração dos pilares econômico, social e ambiental; ou seja, alcançar um desenvolvimento econômico com bem-estar social e protegendo o meio-ambiente. Dentre os 27 princípios apresentados, 11 possuem conexão com o sistema de gestão de resíduos, o que destaca a importância deste sistema para o sucesso de um desenvolvimento sustentável (CHANG E PIRES, 2015).

Atualmente, segundo Brunner e Rechberger (2015), o objetivo da gestão dos resíduos está bem consolidado na proteção do ser humano e do meio ambiente. Muitos países utilizam o princípio hierárquico de reduzir, reutilizar, reciclar, recuperar e depositar (CHRISTENSEN, 2011).

3.2 DEFINIÇÕES FUNDAMENTAIS

O sistema gestão de resíduos sólidos possui inúmeras definições fundamentais para o seu entendimento e planejamento; dentre elas estão os principais conceitos, as diferentes categorias de RS e etapas do sistema de gestão de resíduos sólidos.

3.2.1 Conceitos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) destaca vários conceitos e dentre eles estão:

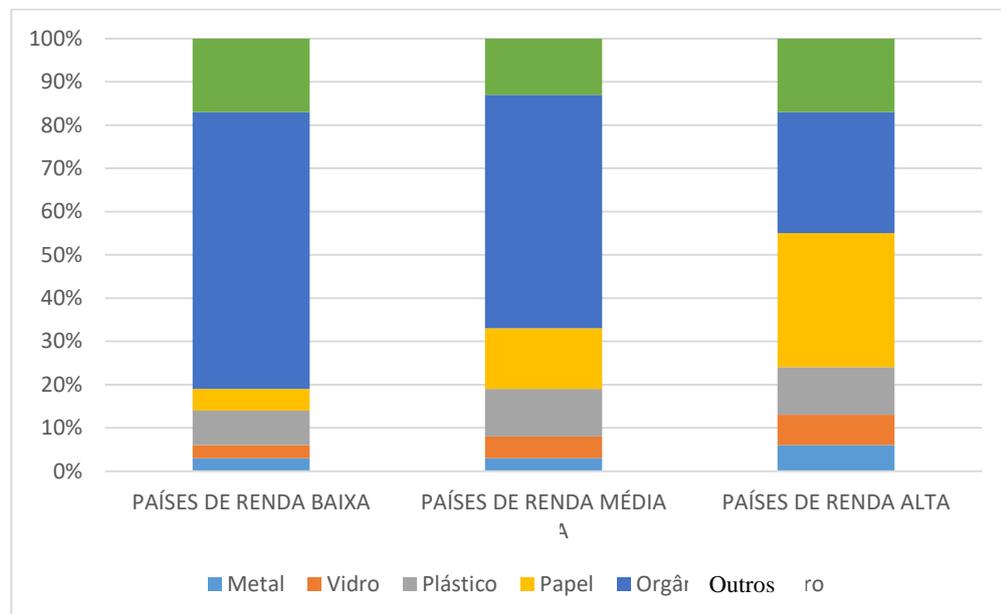
- Gerenciamento de resíduos sólidos - grupo de intervenções praticadas nas fases de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final dos RS, assim como na etapa de destinação final dos rejeitos;
- Gestão integrada de resíduos sólidos - grupo de ações que visam solucionar problemas gerados pelos resíduos sólidos através do desenvolvimento sustentável e de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social;
- Logística reversa - conjunto de ações, procedimentos e meios realizados com o intuito de possibilitar a coleta de resíduos sólidos para reaproveitamento ou outra destinação final ambientalmente adequada;
- Destinação final ambientalmente adequada dos resíduos – destinações admitidas pelos órgãos autorizados do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa). Entre elas estão a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação, o aproveitamento energético e a disposição final, observando normas operacionais específicas, de modo a impedir danos ou riscos à saúde pública e à segurança bem como a minimizar os impactos ambientais negativos;

- Rejeitos: resíduos sólidos que possuam a disposição final ambientalmente adequada como única opção de destinação. São considerados rejeitos somente depois de esgotadas todas as alternativas de tratamento e recuperação através de tecnologias disponíveis e economicamente viáveis.

Outro conceito básico é a gravimetria. Nos sistemas de RS, gravimetria é uma análise que indica a quantidade de cada material em um determinado tipo de resíduo. Segundo a COMLURB (2005) e Chang e Pires (2015), a gravimetria dos RS é essencial para a eficiência do planejamento, do projeto e da operação de um sistema de gestão de resíduos sólidos, já que as características físicas e químicas (como o poder calorífico e a densidade) mudam de acordo com o tipo de material.

A composição dos resíduos sólidos de uma região é bastante influenciada pela renda da população. Quanto menor a renda, maior é o percentual de material orgânico; por outro lado, quanto maior a renda, menor é a participação de materiais orgânicos e maior é a parcela de materiais recicláveis (ver gráfico 1).

Gráfico 1: Gravimetria dos RS de diferentes tipos de países



Fonte: World Bank (2012), modificado pelo autor

3.2.2 Classificação dos resíduos sólidos

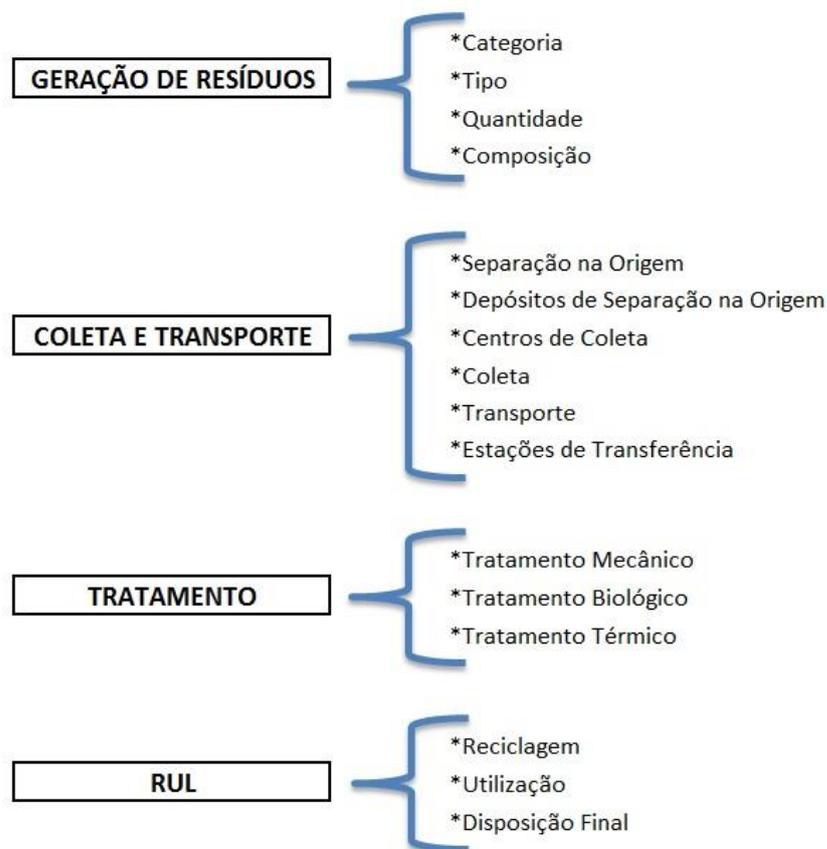
A PNRS (BRASIL, 2010) classifica os resíduos sólidos em 11 categorias, desde resíduos domiciliares até resíduos de mineração.

- Resíduos domiciliares – resultam de práticas de origem doméstica;
- Resíduos de limpeza urbana – resíduos de varrição, limpeza de logradouros, entre outros;
- Resíduos sólidos urbanos – resíduos domiciliares e de limpeza urbana;
- Resíduos de estabelecimento comerciais e prestadores de serviços – resíduos produzidos por essas atividades exceto os de limpeza urbana, dos serviços públicos de saneamento básico, de serviços de saúde, da construção civil e de serviços de transportes;
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico – resíduos dessas atividades exceto os resíduos sólidos urbanos;
- Resíduos industriais – resíduos provenientes de transformações produtivas e instalações;
- Resíduos de serviços de saúde – resíduos citados pelos órgãos do SISNAMA e do SNVS;
- Resíduos da construção civil – resíduos gerados por obras civis (construções, reformas, demolições, entre outros);
- Resíduos agrossilvopastoris – resíduos produzidos em atividades agropecuárias e silviculturais;
- Resíduos de serviços de transportes – resíduos resultantes de infraestruturas de transporte, como porto, ferrovias rodoviárias, entre outros;
- Resíduos de mineração – resíduos provenientes das atividades de mineração.

3.2.3 Etapas da gestão de Resíduos Sólidos (RS)

Christensen (2011) divide o sistema de gestão de resíduos sólidos nas etapas de geração de resíduos, coleta e transporte, tratamento e, por último, a etapa RUL - reciclagem, utilização e disposição final (ver Figura 9).

Figura 9: Etapas do sistema de gestão de resíduos sólidos



Fonte: Christensen (2011), modificado pelo autor

Estas etapas podem ser descritas como abaixo:

- Geração de resíduos – a geração de resíduos é a primeira etapa do sistema e é nela que são definidas características básicas dos resíduos - como categoria, tipo, quantidades e composição. Christensen (2011) afirma que a taxa de geração por unidade (em kg/ano/pessoa) é um parâmetro conveniente para projetar a quantidade de RS gerada em uma região;
- Coleta e transporte - esta etapa refere-se à separação e armazenamento organizado dos resíduos na origem, aos centros de coletas, à coleta, ao transporte dos RS do ponto de coleta até uma unidade de tratamento ou RUL, e às estações de transferência de resíduos de um veículo menor para um maior;

- Tratamento - Christensen (2011) cita que, nesta etapa, os RS são tratados através de diferentes tipos de tratamentos (mecânico, térmico ou biológico) com o intuito de recuperar resíduos recicláveis, extrair energia ou alterar certas características dos resíduos (volume, nível de contaminantes etc.).
- Reciclagem/Utilização/Disposição Final (RUL) - tem o objetivo de recuperar e utilizar materiais dos resíduos com algum fim ou depositá-los de forma segura. Na reciclagem, o material virgem é substituído pelo mesmo tipo de material reciclado (como vidro, alumínio, papel e plástico). Já a utilização é o uso de frações dos resíduos ou de resíduos tratados em formas alternativas (como o uso dos RS resultantes do tratamento biológico como fertilizante para terra; uso de frações de plástico e papel como combustível para indústrias de cimento etc.). Por fim, a disposição final deposita os resíduos em aterros.

3.2.4 Modelo centralizado e descentralizado

Em um sistema de gestão de resíduos sólidos, alternativas de tratamento de RS -como centros de triagem, unidades de compostagem e digestores anaeróbicos - podem ser planejadas e implementadas seguindo o modelo centralizado ou descentralizado. Segundo Liyala (2011), a escolha entre as opções centralizadas e descentralizadas é um assunto bastante debatido no âmbito do setor das infraestruturas urbanas e prestação de serviços.

As alternativas de modelo centralizado possuem estruturas com grande capacidade de processamento de resíduos, alto grau de tecnologia e automatização (menos mão de obra), situam-se em áreas geográficas específicas e são controladas por uma grande estrutura corporativa. Este modelo consegue reduzir os custos por tonelada de RS; entretanto, necessita de elevado investimento inicial; e, por este motivo, é mais comum em países e regiões de alta renda (CHANG E PIRES, 2015).

Chang e Pires (2015) afirmam que as alternativas de modelo descentralizado se caracterizam por unidades locais com processos de baixa escala de processamento de resíduos, que utilizam pouca tecnologia e automatização, necessitando de maior número de pessoas trabalhando. Este modelo é mais frequentemente usado em países e regiões de baixa e média renda, devido ao menor nível de complexidade e menor investimento. No entanto, o custo por tonelada tratada é geralmente maior porque as unidades possuem baixa escala de RS e elevado custo de mão de obra.

3.3 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Após mais de vinte anos de discussões no Congresso Nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída em 2010 através da Lei federal 12.305. Uma das principais características da PNRS é a definição de um conjunto de práticas que buscam avanços no sistema de resíduos sólidos do Brasil; o art. 4º dessa lei deixa isto claro:

Art.4º A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. (BRASIL, 2010, pág.12)

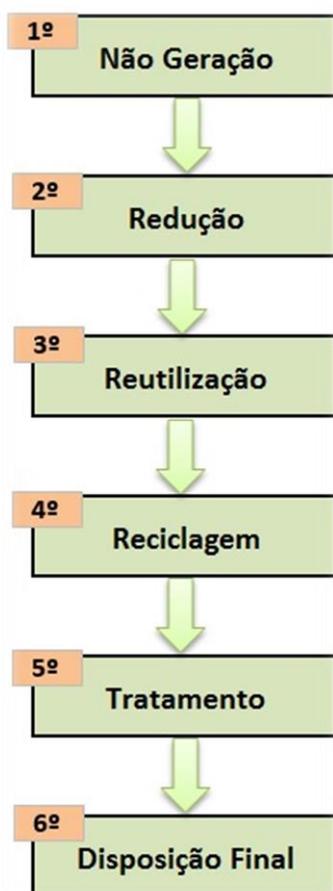
De acordo com o Instituto Ethos (2012), a PNRS reúne definições atuais e avançadas de gestão de resíduos sólidos (RS) que levam em conta leis relacionadas ao tema, como a Lei de Saneamento Básico (14.445/07) e a Lei 12.197, referente a Política Nacional sobre mudanças climáticas, que possui foco na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Logo, constata-se a PNRS como uma política de visão sistêmica e essa constatação é reforçada pela própria PNRS ao afirmar que a gestão de resíduos é um grupo de ações em busca de melhorias para o sistema de RS, de modo a avaliar os ambientes político, econômico, ambiental, cultural e social, por meio do controle social e em conformidade com o desenvolvimento sustentável. Esta política, em vigência, aponta os cidadãos, governos, setor privado e sociedade civil organizada como responsáveis, de forma compartilhada, pela gestão ambientalmente correta dos RS.

Neste esforço por evolução, o Art. 9º da PNRS (BRASIL, 2010) frisa que a gestão e gerenciamento de RS necessitam seguir uma ordem de 6 prioridades (ver Figura 10). As prioridades são:

i) Não geração – é a missão prioritária da gestão e gerenciamento de RS do país. Ações de educação ambiental são imprescindíveis para alcançar maior eficiência na não geração de resíduos sólidos;

ii) Redução – a redução na geração de resíduos sólidos é apontada como foco de segunda importância. Iniciativas de educação ambiental e inovações/melhorias no processo produtivo possuem grande influência na redução da produção de RS;

Figura 10: Ordem de prioridade da gestão e gerenciamento de RS segundo a PNRS



Fonte: Elaborada pelo Autor

iii) Reutilização – a reutilização vem logo em seguida na escala de prioridades. Esta iniciativa, através da extensão da vida útil dos resíduos, colabora com a redução do consumo de energia e matérias primas utilizadas nos processos produtivos;

iv) Reciclagem – a reciclagem, assim como a reutilização, ajuda na redução do consumo de energia e de matérias primas utilizadas nos processos produtivos; entretanto, ela difere da reutilização pelo fato dos RS passarem por um processo de transformação para gerar a matéria prima reciclada;

v) Tratamento - estes tratamentos utilizam processos físicos, biológicos e/ou químicos com o intuito de reduzir os impactos negativos ambientais e sanitários além de favorecer a criação de valor econômico dos RS (FADE, 2014); e

vi) Disposição Final - por fim, a PNRS informa a necessidade da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Neste momento, deve-se utilizar normas específicas com o objetivo de mitigar os impactos negativos dos rejeitos no ambiente. Um exemplo de disposição final é o aterro sanitário; por outro lado, a disposição final em lixões é classificada como imprópria pelo motivo desta opção não possuir o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

No Brasil, o tratamento é a penúltima opção na gestão dos RS, entretanto, na prática, o tratamento dos resíduos pode acontecer antes da reutilização e da reciclagem com o intuito de tornar possível ou aumentar a quantidade de RS reutilizados e reciclados. Exemplo disso é a utilização de unidades de tratamento mecânico que separam os resíduos recicláveis com o objetivo de vendê-los, posteriormente, para indústria de reciclagem.

Além de seguir as seis etapas de priorização apresentadas acima, a PNRS enfatiza que um modelo de gestão e gerenciamento de RS no País necessita focar principalmente nos objetivos de:

- Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- Incentivo à indústria da reciclagem;
- Adoção de tecnologias como forma de minimizar impactos negativos dos RS;
- Estímulo a criação de sistemas de gestão de RS otimizados, abrangendo tratamentos de recuperação energética dos resíduos sólidos.

Em relação aos tratamentos de recuperação energética, a PNRS (BRASIL, 2010) aborda no seu artigo 9º a restrição na qual somente poderão ser utilizadas técnicas comprovadas de viabilidade técnica e ambiental e que possuam um programa de monitoramento de emissão de gases poluentes com aprovação do órgão ambiental. Logo, é imprescindível que seja realizado um estudo aprofundado das características de cada tecnologia de tratamento e das boas práticas que estão sendo usadas pelo mundo.

Quanto à indústria da reciclagem, os catadores de RS recicláveis colaboram consideravelmente para a cadeia produtiva participando de diversas atividades como coleta coletiva, triagem, classificação, processamento e comercialização dos materiais recicláveis. Neste âmbito, a PNRS destaca o processo de inclusão social dos catadores a fim de combater as desigualdades sociais. Este aspecto é sustentado pela PNRS ao anunciar, como um de seus princípios, que os RS reutilizáveis e recicláveis possuem valor econômico e social que geram trabalho e renda e desenvolve a cidadania. Vários estudos (GATTAI, 2014; AMORIM, 2012; SOTO, 2011) apresentam a Economia Solidária como uma ferramenta importante na viabilização e potencialização do atendimento deste princípio.

No que diz respeito ao planejamento da gestão dos RS nos Estados, a PNRS deixa claro - nos art. 8, 45 e 79 - que os consórcios públicos possuem preferência na conquista de recursos da União ou por ela controlada. Esta prioridade também é oferecida aos Estados que criarem microrregiões e aos municípios que optarem pela boa prática de consórcios intermunicipais para a gestão em conjunto. Segundo o MMA (BRASIL, 2011), o atual cenário para consórcios na área de RS tem o respaldo da Lei 11.107, que é incentivada e priorizada pela PNRS com o objetivo de gerar economia de escala e propiciar evolução da gestão dos RS no País.

Recentemente, em junho de 2016, foi instituída a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) do Estado do Ceará que integra a PNRS com foco nos princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes e ações adotadas pelo Governo Estadual do Ceará.

Além de citar os mesmos objetivos da PNRS, a PERS (CEARÁ, 2016) destaca a importância do diagnóstico, contendo os fluxos de resíduos no Estado e seus impactos socioeconômicos e ambientais, e da proposição de cenários para o sistema de gestão integrado de resíduos sólidos do Ceará.

3.4 BOAS PRÁTICAS DE TRATAMENTO DE RSU NO BRASIL E NO MUNDO

Atualmente, existem inúmeras tecnologias para tratar resíduos sólidos e cada uma delas gera resultados diferentes. Christensen (2011) afirma que tratamentos mecânicos, biológicos e térmicos podem ser usados separadamente ou em soluções agregadas com o intuito de recuperar resíduos recicláveis, extrair energia ou alterar certas características dos resíduos (como volume e nível de contaminantes, dentre outros).

3.4.1 Tratamento mecânico

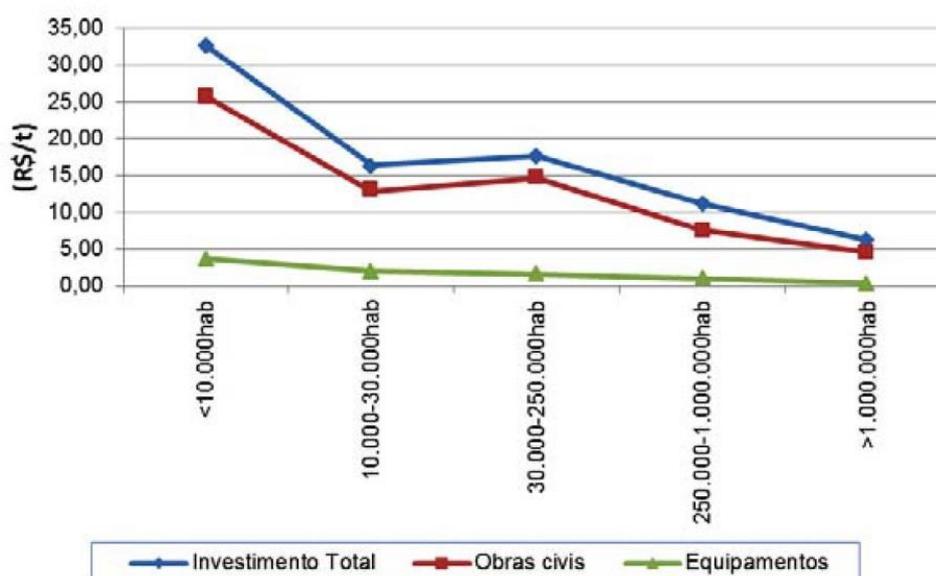
Segundo Chang e Pires (2015), a separação dos RS em diferentes materiais é uma ação essencial para os resultados da gestão de RSU de qualquer região. Neste contexto, o tratamento mecânico ajuda na obtenção de melhores resultados através de processos de redução de tamanho, triagem e compactação dos resíduos sólidos.

Este tipo de tratamento é realizado logo após as etapas de coleta e transporte, sendo o seu processo facilitado quando há separação e coleta seletiva na fonte de geração. Os processos ocorrem em unidades de triagem (manuais ou automatizadas), onde acontecem as atividades de separação, limpeza e acondicionamento, por tipo de material, para uma posterior utilização ou venda (FADE, 2014). No levantamento mais recente encontrado (IPEA, 2012), estima-se que, no Brasil, em 2008, existiam 445 municípios com unidades de triagem.

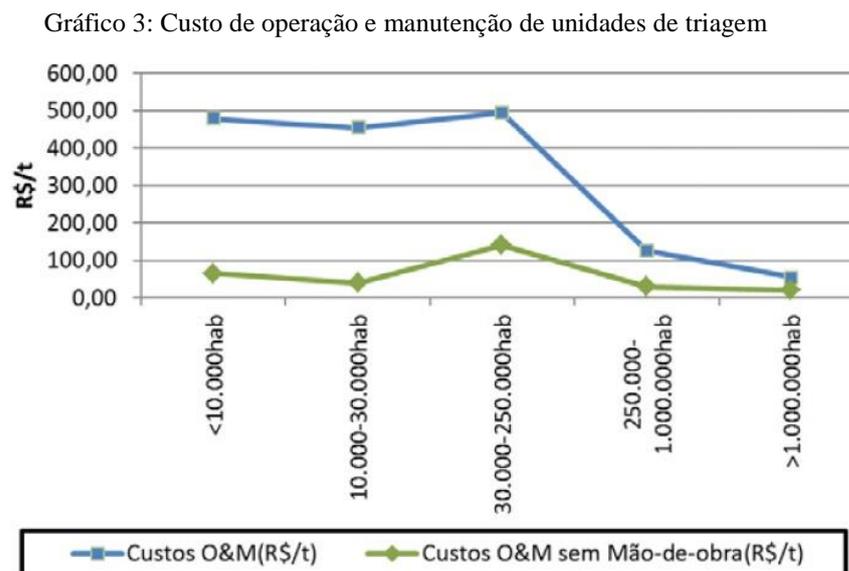
- Característica econômica

A FADE (2014) descreve os custos de implantação (Gráfico 2), operação e manutenção (Gráfico 3) de unidades de triagem, em relação ao número de habitantes do município.

Gráfico 2: Custo de implantação de unidades de triagem



Fonte: FADE (2014)



Fonte: FADE (2014)

O custo de implantação representa o maior percentual dos custos (entre 68% e 80%, dependendo do nível de mecanização) e refere-se à aquisição de terreno e à construção de galpões, área administrativa e locais de armazenamento. O aumento da quantidade de habitantes do município gera uma tendência de diminuição do custo por unidade de resíduo processado; isto ocorre, principalmente, devido a maior mecanização e ao menor gasto com mão de obra e encargos, que chegam a ser até 90% dos custos de operação e manutenção em centros de triagem manual (FADE, 2014).

Em relação a geração de receita, o material reciclável, principal produto dos centros de triagem, possui grande valor econômico. Várias matérias primas recicladas possuem vantagem econômica em comparação aos insumos virgens, o que gera interesse de empresas. Apesar disto, o Brasil perde cerca de 8 bilhões de reais por ano ao não reciclar materiais que vão para aterros ou lixões (CEMPRE, 2013).

- Característica Ambiental

A reciclagem de materiais dos resíduos sólidos urbanos possui um papel ambiental importante na redução da quantidade de RS que vai para o aterro, aumentando a vida útil dessas unidades (CHESTER *et al.*, 2008), e na diminuição da emissão de gases de efeito estufa (KING E GUTBERLET, 2013). O processo mecânico não produz e mitiga a geração de gases de efeito estufa. Segundo a FADE (2014), a emissão de GEE mitigada pode ser mensurada através da quantidade de RS evitada de ser depositada em aterro.

- Característica Social

Agarwal *et al.* (2005) destacam o benefício social gerado por toda cadeia produtiva da reciclagem, incluindo os centros de triagem, através da geração de empregos. Vários trabalhos apontam iniciativas, em municípios do Brasil, de inserção de catadores de materiais recicláveis em centros de triagem através da criação de associações e cooperativas (GATTAI, 2014; AMORIM, 2012; SOTO, 2011; MARELLO E HELWEGE, 2014), gerando inclusão social e renda média de R\$ 511,5 por catador (CEMPRE, 2013).

O número de empregos gerados nos centros de triagem depende da quantidade de resíduos e do nível de automatização das atividades. Os centros de triagem automatizados geram, aproximadamente, 10 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas (ILSR, 1997). Por outro lado, em centros de triagem manual, o Ministério das Cidades (BRASIL, 2008) indica aproximadamente 50 trabalhadores para cada 10 mil toneladas por ano; ou seja, 5 vezes mais empregos do que os produzidos nas unidades automatizadas.

- Característica Técnica

De acordo com Chang e Pires (2015), a tecnologia utilizada no tratamento mecânico é mundialmente popularizada e madura, especialmente na Europa Ocidental e em alguns países da Ásia. Ao comparar com outros tipos de tratamento, a viabilidade é alta com baixo risco de falta de conhecimento técnico e pouca necessidade de mão de obra especializada, principalmente em centros de triagem manual, sendo a triagem automatizada um pouco menos viável.

- Característica Regulatória

Ao analisar a ordem de prioridade dos processos de gestão e gerenciamento (PNRS, Art.9º), o processo físico segue a ordem de prioridade de forma efetiva. Um dos principais objetivos da PNRS é o incentivo à indústria da reciclagem (4ª nível de prioridade) e a triagem dos RSU é essencial para efetivá-lo.

3.4.2 Tratamento Biológico

O tratamento biológico consiste em um grupo de processos biológicos e químicos com vistas à decomposição da matéria orgânica. Na prática, as unidades de tratamento biológico podem utilizar as técnicas aeróbica (compostagem) ou anaeróbica (digestão anaeróbica), separadamente ou de forma conjunta (CHRISTENSEN, 2011).

a) Compostagem

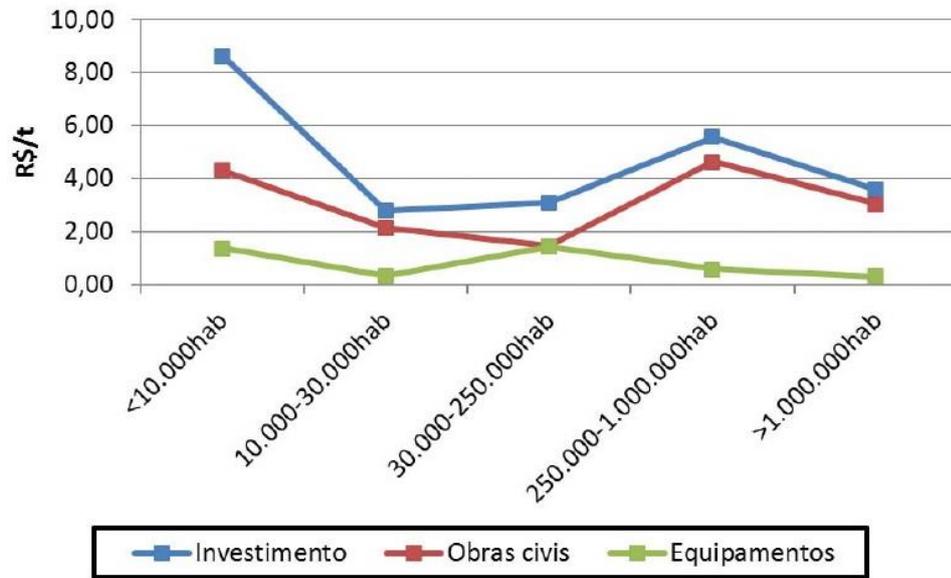
A compostagem é um processo aeróbico (na presença de oxigênio) e possui o composto ou fertilizante, que é rico em húmus e nutrientes para plantas, como produto final (ABBASI E RAMASAMY, 1999).

Entre as unidades existentes no mundo, Williams (2005) cita o exemplo da usina de compostagem de modelo centralizado localizada em Copenhague, na Dinamarca, que trata resíduos biodegradáveis da cidade e possui capacidade de processar até 60.000 toneladas de resíduos por ano. Já no Brasil, destacam-se as unidades descentralizadas, onde só na cidade de São Paulo existem aproximadamente 48 unidades (SIQUEIRA E ASSAD, 2015).

- **Característica Econômica**

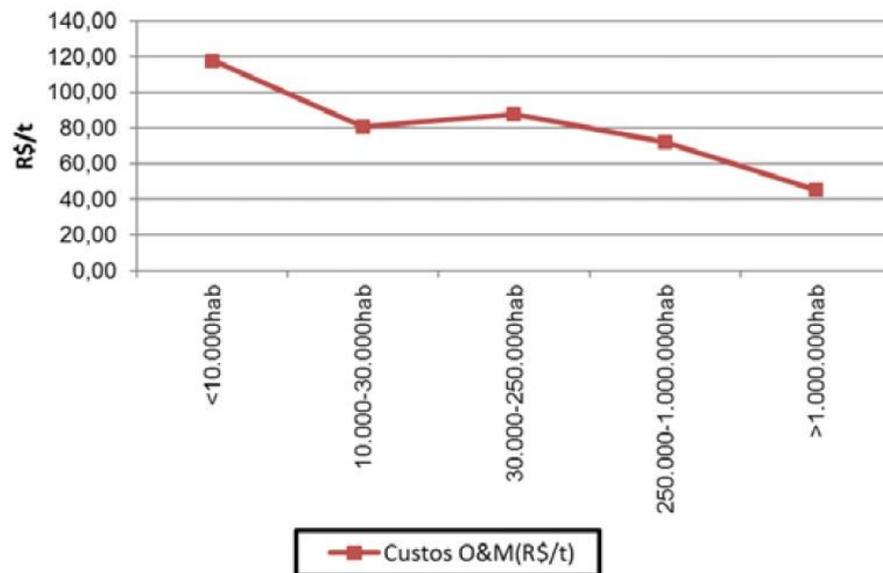
Os custos por tonelada de resíduos tratados nas unidades de compostagem tendem a diminuir com os ganhos de escala proporcionados por um maior nível de automatização e um maior processamento. Unidades de compostagem em municípios com mais de 1 milhão de habitantes possuem custos unitários, tanto de implantação quanto de operação & manutenção, até mais que 60 % menores do que municípios com menos de 10 mil habitantes (ver gráficos 4 e 5).

Gráfico 4: Custo de implantação de unidades de compostagem



Fonte: FADE (2014)

Gráfico 5: Custo de operação e manutenção de unidades de compostagem



Fonte: FADE (2014)

A usinas de compostagem geram receita através da venda do composto produzido a partir dos RSU. Segundo a FADE (2014), o Brasil possui carência na produção de fertilizante para a

agricultura - cerca de 70% da demanda nacional é importada. Neste contexto, o produto da compostagem possui grande potencial comercial; ao comparar com o adubo químico, o composto tem boa qualidade e preços (entre R\$ 100,00 e R\$ 150,00 por tonelada) que chegam a ser quase 90% mais baratos (CEMPRE, 2016). A WWF – Brasil (2015) cita que 100 kg de resíduos orgânicos geram em torno de 30 a 40 kg de composto.

- Característica Ambiental

Alguns dos pontos fortes da compostagem de RS são a estabilização biológica, a diminuição do volume de resíduos dispostos em aterros e a mitigação da emissão de GEE. De acordo com Inácio et al. (2010), a metodologia AMS.III.F estima que a compostagem gera 10 vezes menos gás metano do que o aterro. Para o cálculo de produção de metano na compostagem, a metodologia AMS.III.F usa o valor de 4,0 kg e 10,0 kg de gás metano para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente. O gás carbônico não é gerado nesse tratamento.

A diminuição da quantidade de resíduos dispostos em aterro é igual a 100% do resíduo orgânico tratado. Segundo o Guia para a Compostagem realizado pela WWF – Brasil (2015), o tratamento de compostagem transforma todo o RS orgânico em composto, calor, água e gases.

- Característica social

Estudo realizado pelo Institute For Local Self-Reliance (ILSR, 1997) aponta que as unidades de compostagem com operação mecanizada geram em torno de 4 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de resíduos orgânicos tratados, valor 4 vezes maior do que a quantidade de empregos criados em aterros. Em relação às unidades com operação manual, a WWF – Brasil (2015) define a necessidade de 6 trabalhadores para cada 4,38 mil toneladas anuais de resíduos, ou seja, 14 empregos para cada 10 mil toneladas, 3,5 vezes mais que as unidades mecanizadas.

- Característica Técnica

O Centro de Apoio Operacional às Promotorias de Proteção ao Meio Ambiente - CAOPMA (2013) afirma que a compostagem, comparando com outros tipos de tratamento de RSU, é uma técnica já consolidada e possui grande simplicidade e praticidade em seus processos, o que exige pouca especialização da mão de obra. Entretanto, ao longo dos anos no

Brasil e em vários países de baixa renda, as usinas de compostagem de modelo centralizado não foram bem-sucedidas, sendo os baixos índices de coleta seletiva um dos principais motivos (ALI, 2004; FEHR, 2010). Um estudo sobre as experiências de compostagem de RSU na cidade de São Paulo, realizado por Siqueira e Assad (2015), apresenta um histórico em que as unidades centralizadas têm risco de falir, aproximadamente, três vezes maior do que as unidades descentralizadas.

- Característica Regulatória

A compostagem segue a ordem de prioridade dos processos de gestão e gerenciamento, porque evita a disposição final de resíduos com possibilidade de tratamento.

- b) Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é realizada por microrganismos, na ausência de oxigênio, e gera e captura o gás metano (biogás) para posteriormente utilizá-lo como fonte de energia.

Arsova (2010) afirma que a Europa, os Estados Unidos, a China e a Índia usam intensivamente essa tecnologia. A cidade de Berlin, na Alemanha, é um exemplo de região que utiliza a digestão anaeróbica na gestão dos RSU. Segundo Schulze (2013), Berlin trata todos os resíduos orgânicos recolhidos em um digestor anaeróbico, onde o biogás produzido é utilizado em veículos a gás natural para a coleta de resíduos.

- Característica Econômica

Em relação aos custos de investimento e operação & manutenção, a FADE (2014) cita que as unidades com capacidade de processamento de 66 t/dia possuíam custos unitários de investimento de R\$ 37,12/t e de operação & manutenção de R\$ 100,00/t. Já as unidades com capacidade de 225 t/dia geram custos de investimento de R\$ 35,54/t e de operação & manutenção de R\$ 50,00/t.

A quantidade de energia gerada pelos biodigestores pode ser estimada através de modelos matemáticos e da definição de alguns parâmetros técnicos da tecnologia (SILVA, 2015). Após calcular a energia produzida, é possível projetar parte da receita da usina multiplicando o valor encontrado pelo preço de venda da energia elétrica praticada na região.

Além da receita do biogás, essas usinas podem incluir o processo de compostagem e

produzir composto para venda. Um exemplo é a planta de tratamento biológico de RSU situada em Portugal que gera e captura o biogás e, também, produz composto (CHANG E PIRES, 2015).

- Característica Ambiental

Entre as principais características dos digestores anaeróbicos estão a redução da emissão de GEE dos RSU e a capacidade de reduzir o volume do resíduo orgânico em 70% (HARTMANN E AHRING, 2005). Em usinas que também realizam a compostagem, a diminuição da quantidade de resíduo dispostos em aterro é igual a 100% do resíduo orgânico tratado.

Os principais GEE emitidos no ambiente pelo biodigestor são o CH₄, que não consegue ser coletado no processo, e o CO₂, resultante da combustão do biogás para gerar energia. Dados da European Commission (2006) apontam que é emitido entre 0 e 411 gramas de gás metano e entre 181 kg e 520 kg de gás carbônico para cada tonelada de resíduo tratado.

- Característica Social

Os biodigestores anaeróbicos geram, aproximadamente, o mesmo número de empregos que as unidades de compostagem; ou seja, 4 e 14 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de resíduos orgânicos tratados em unidades centralizada e descentralizada, respectivamente. Em biodigestores anaeróbicos que também realizam a compostagem, a quantidade de empregos gerada pode até dobrar (8 e 28 empregos).

- Característica Técnica

Os biodigestores possuem uma menor viabilidade em relação as unidades de compostagem, devido a um pequeno aumento na exigência de especialização da mão de obra. Kalyani e Pandey (2014) afirmam que usinas de larga escala (de modelo centralizado) na Índia tiveram insucesso devido à dificuldade de obter resíduos orgânicos separados para abastecer o processo, diferentemente das usinas de menor escala (de modelo descentralizado), que vêm obtendo bons resultados.

- Característica Regulatória

Os biodigestores seguem a ordem de prioridade dos processos de gestão e gerenciamento, porque evitam a disposição final de resíduos com possibilidade de tratamento.

3.4.3 Tratamento térmico

O tratamento térmico de RS realiza a queima controlada e devidamente preparada dos resíduos para diminuir o seu volume e gerar energia. Os gases resultantes passam por filtros que visam diminuir seus níveis contaminantes; já as escórias, em algumas tecnologias, podem ser utilizadas como matéria prima para produtos da construção civil. Existem vários tipos de tecnologias térmicas, destacando-se a incineração, a pirólise, a gaseificação e a arco de plasma.

a) Incineração

Dentre as tecnologias térmicas, a incineração é a mais antiga e evoluiu consideravelmente no seu processo de tratamento de contaminantes. Na atualidade, essa alternativa térmica possui o maior índice de uso. Dados da FEAM (2010) apontam que cerca de 72% dos RSU do Japão são incinerados.

- Característica Econômica

Unidades com capacidade máxima de 650 t/dia possuem custos unitários de investimento de R\$ 95,31/t e de operação & manutenção de R\$ 108,88/t. Já as unidades com capacidade de 1.300 t/dia geram custos de investimento de R\$ 75,74/t e de operação & manutenção de R\$ 95,46/t (FADE, 2014).

A geração de receita através da venda da energia elétrica gerada pelo sistema depende de vários fatores. Segundo Lombardi, Carneval e Corti (2015) e Yap e Nixon (2015), a eficiência na geração de energia dessas usinas pode variar bastante dependendo do tamanho da unidade e do nível de umidade e poder calorífico dos resíduos; usinas grandes com elevadas taxas de processamento possuem maior percentual de geração de energia; por outro lado, RSU com alta umidade e baixo poder calorífico prejudicam o seu processo de recuperação de energia.

- Característica Ambiental

Entre os tratamentos mencionados, o tratamento térmico possui o maior índice de redução de volume dos resíduos, podendo variar entre 80-90% (LOMBARDI, CARNEVALE e CORTI, 2015).

O CO₂ é a principal GEE emitido pelos incineradores de RSU, sendo gerados, em média, 0,415 mg de CO₂ danoso ao meio ambiente a cada 1,0 mg de resíduo processado, o que permite calcular as emissões deste gás quando do uso desta tecnologia. Já o CH₄ não é gerado durante as operações normais da incineração (JOHNKE, 2002).

- Característica Social

O ILSR (1997) cita que as unidades de incineração geram aproximadamente 1 emprego para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas. Este valor é igual à quantidade de empregos criados em aterros e menor que as outras opções de tratamento.

- Característica Técnica

O risco de insucesso de incineradores em países de média e baixa renda é grande (Ex.: Índia). Essas regiões não possuem domínio da tecnologia, há escassez de mão de obra qualificada e o poder calorífico dos RS é baixo, o que prejudica o rendimento de geração de energia (YAP E NIXON, 2015).

Segundo Themelis, Barriga, Estevez e Velasco (2013), deve-se investir em usinas de tratamento térmico com processamento de, pelo menos, 200.000 toneladas por ano, uma vez que quantidades menores tornam o investimento financeiramente inviável.

- Característica regulatória

Dependendo do tipo de material incinerado, a incineração pode ou não seguir o âmbito regulatório. Para estar de acordo com a ordem de prioridade da PNRS, deve-se evitar a incineração de materiais recicláveis, já que a reciclagem é prioridade em relação ao tratamento de resíduos.

b) Pirólise

A pirólise é conhecida pelo seu processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio que produz produtos recicláveis com potencial de geração de energia como gás, óleo e carvão (CHEN, YIN, WANG & HE, 2014). A FEAM (2010) aponta a cidade de Günzburg na Alemanha como uma das primeiras a utilizar uma usina de pirólise para processar seus resíduos municipais. Entretanto, existem poucas usinas com esta tecnologia e, por isto, não há muitas informações sobre suas características e seus impactos.

c) Gaseificação

Esta tecnologia atinge temperaturas maiores do que a incineração, reduzindo ainda mais os índices de contaminantes como o CO₂ e resultando em eficiência de até 30% na conversão de energia. Por outro lado, as unidades de gaseificação são mais complexas do que os incineradores, ocasionando a necessidade de mão de obra mais capacitada e custos mais elevados. Esta dificuldade ocorre essencialmente por causa do processo de resfriamento e limpeza do gás resultante (YAP & NIXON, 2015).

d) Arco de plasma

A tecnologia arco de plasma é a mais recente dos tratamentos térmicos e trabalha com maiores temperaturas, em comparação às outras tecnologias, produzindo um gás mais limpo. As grandes temperaturas geradas pela tocha de plasma (acima de 10.000°C) causam a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples.

No entanto, um recente estudo realizado por um especialista em avaliação de tecnologias (CICERI, 2014) conclui que, apesar do tratamento por arco de plasma mostrar alguns indícios de vantagens como a existência de dados de amostras certificadas em escala de demonstração apontando índices de emissão de contaminantes e dioxinas menores que outros métodos e dentro das normas da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA), sua aplicação ainda é relativamente pouco provada para os resíduos sólidos urbanos e seu investimento é alto comparado às outras opções. Logo, a utilização desta tecnologia na gestão dos resíduos de uma região tem maior risco em relação às outras alternativas mais usadas.

3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O capítulo 03 atingiu os objetivos específicos de realçar a importância das boas práticas da gestão/gerenciamento dos resíduos sólidos, com ênfase para aos diferentes tipos de tratamentos existentes, e de ajudar na elaboração da abordagem de avaliação de alternativas utilizada no estudo.

Com o passar dos anos, a gestão dos resíduos sólidos evoluiu e, atualmente, possui como principal objetivo o desenvolvimento sustentável com base na integração dos pilares econômico, social e ambiental.

No processo de planejamento do sistema de gestão de resíduos sólidos é essencial o estudo e entendimento de conceitos básicos, dos tipos de resíduos e das etapas presentes no sistema. Além disso, é imprescindível conhecer as características dos modelos centralizado e descentralizado para que a alternativa escolhida obtenha resultados mais próximos do desejado.

No âmbito regulatório deve-se seguir objetivos, princípios e ordem de prioridade definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. A PNRS destaca os objetivos de incentivo à indústria da reciclagem com a geração de emprego e inclusão social de catadores, proteção ambiental e adoção de tecnologias de tratamento de resíduos que sejam tecnicamente viáveis.

Ao estudar as boas práticas de gestão de RSU no Brasil e no mundo, a etapa de tratamento de resíduos apresenta-se como essencial para otimizar a eficiência do sistema. Tratamentos mecânicos, biológicos e térmicos são utilizados mundialmente obtendo resultados diversos; cada tipo de tratamento possui características econômica, ambiental, social, técnica e regulatória diferentes que devem ser consideradas.

Os dados e informações levantadas no capítulo 03, principalmente sobre as características dos diversos tipos de tratamento de resíduos, foram utilizados na elaboração da abordagem de avaliação de alternativas aplicada no capítulo 05.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

O Capítulo 4 tem como objetivo apresentar a metodologia da presente pesquisa. Ele é dividido em 2 partes: Procedimentos Metodológicos e Etapas da Metodologia. A primeira parte explica os procedimentos metodológicos relacionados à classificação da pesquisa e ao levantamento de dados e informações. Na segunda parte descreve-se as etapas da metodologia usada.

4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em um estudo, o uso de métodos e técnicas é de extrema importância. Isso se deve ao motivo de que os procedimentos metodológicos organizam e orientam o passo a passo necessário para a obtenção, análise e interpretação dos dados obtidos ao longo da pesquisa.

De acordo com Silva e Menezes (2005), nessa etapa, é necessário definir onde e como será feita a pesquisa. Deve-se deixar claro a classificação da pesquisa nos diferentes pontos de vista, a população (universo da pesquisa), a amostragem, os instrumentos de coleta de dados e a forma como pretende-se tabular e analisar seus dados.

A pesquisa foi realizada no Município de Juazeiro do Norte, situado na região do Cariri, no sul do Estado do Ceará e focou na problemática da gestão dos resíduos sólidos urbanos da região. A seguir, destacam-se a classificação da pesquisa e o levantamento de dados e informações do presente trabalho.

4.1.1 Classificação da pesquisa

Conforme Silva e Menezes (2005), existem várias maneiras de classificar uma pesquisa e entre as mais comuns estão: do ponto de vista da sua natureza, do ponto de vista da forma de abordagem do problema, do ponto de vista de seus objetivos e do ponto de vista dos procedimentos técnicos.

- Do ponto de vista da sua natureza

Levando em conta a sua natureza, o presente estudo é classificado como uma pesquisa aplicada. Nela busca-se gerar conhecimentos para aplicação prática com o intuito de solucionar problemas (SILVA E MENEZES, 2005).

- Do ponto de vista da forma de abordagem do problema

Essa pesquisa adotou abordagem quantitativa, objetivando traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e estudá-las, e qualitativa, buscando interpretar os fenômenos e atribuir significados (SILVA E MENEZES, 2005).

- Do ponto de vista de seus objetivos

No enfoque dos seus objetivos, esta pesquisa é considerada como exploratória e descritiva. Exploratória pelo fato de propiciar uma familiaridade entre o pesquisador e o tema estudado que é pouco conhecido e explorado. E descritiva, porque possibilita a descrição das características e consequências do fenômeno analisado (GIL, 1991).

- Do ponto de vista dos procedimentos técnicos

Em relação aos procedimentos, este trabalho classifica-se como pesquisa bibliográfica pelo fato de ser baseada em teorias levantadas de materiais bibliográficos já publicados (GIL, 1991).

Gil (1991) afirma que a pesquisa experimental define um objeto de estudo, seleciona variáveis e observa os efeitos que as variáveis produzem no objeto. Considerando o conceito desse autor, esta pesquisa também pode ser classificada como pesquisa experimental por meio da aplicação de um modelo de análise multicritério (AHP), que traduz em pesos os dados e informações coletadas, ponderando assim a definição da alternativa de tratamento de RSU ideal para o Município de Juazeiro do Norte.

4.1.2 Levantamento de dados e informações

A seguir são descritas as características da população (universo da pesquisa), da amostragem, dos instrumentos de coleta de dados e da forma de tabulação e análise de dados.

a) População e amostragem

A população da pesquisa engloba as partes interessadas o sistema de gestão de RSU do Município de Juazeiro do Norte. Já a amostragem, é não-probabilística com amostras intencionais na qual o julgamento do pesquisador foi utilizado para selecionar membros da população que são fontes de informação precisa (SILVA E MENEZES, 2005)

b) Coleta de dados e informações

No levantamento de dados e informações utilizou-se fontes primárias e fontes secundárias. Os dados primários foram levantados através de dois questionários. O questionário 01 (apêndice A) contém 16 questões e foi aplicado, na pesquisa de campo, à 5 membros do sistema estudado. Já o questionário 02 (apêndice B) tem 3 questões e foi aplicado à 8 especialistas da área de resíduos sólidos para avaliar critérios e subcritérios de análise de alternativas. Os entrevistados do primeiro questionário foram escolhidos através de julgamento subjetivo do pesquisador e sugestões dos representantes da Autarquia Municipal de Meio Ambiente de Juazeiro do Norte - AMAJU. Os entrevistados do segundo questionário foram escolhidos a partir de sugestões de especialistas da área que compõem o grupo de estudos do GLEN.

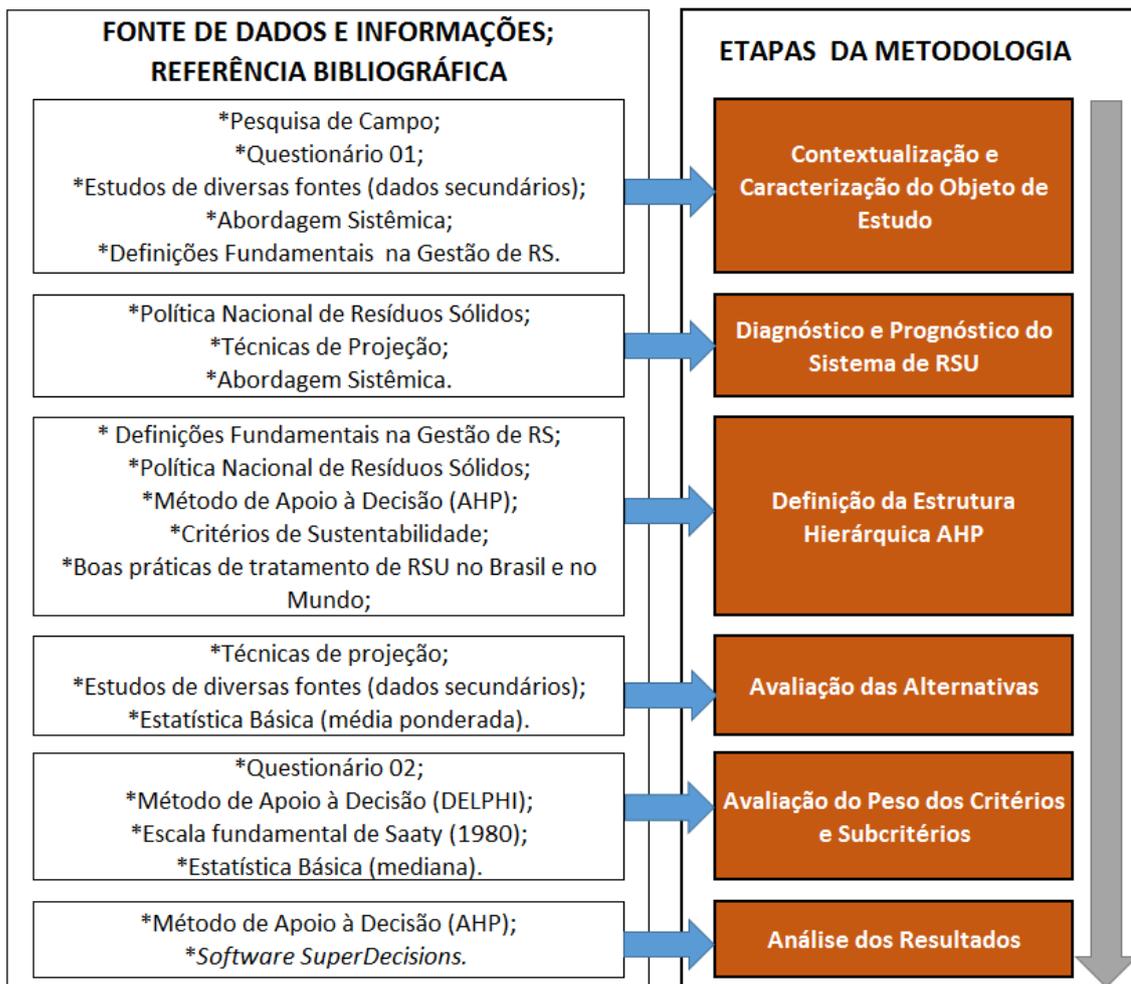
c) Tabulação e análise de dados

Na tabulação e análise de dados foi usado computador *notebook* com o programa *Microsoft Excel* 2013 para dar suporte à organização dos dados de geração de resíduos, à realização de cálculos, e à criação de tabelas, quadros, gráficos e figuras.

4.2 ETAPAS DA METODOLOGIA

A metodologia utilizada é dividida nas seguintes etapas: (1) Contextualização e Caracterização do Objeto de Estudo, (2) Diagnóstico e Prognóstico do Sistema de RSU, (3) Definição da Estrutura Hierárquica AHP, (4) Avaliação das Alternativas, (5) Avaliação do Peso dos Critérios e Subcritérios e (6) Análise dos Resultados.

Figura 11: Etapas da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor

a) Contextualização e caracterização do objeto de estudo

Essa etapa tem o objetivo de descrever o objeto de estudo através de informações gerais da região e de características específicas de cada uma das 4 etapas do sistema de gestão de RSU de Juazeiro do Norte (Geração de resíduos, Coleta e transporte, Tratamento e RUL).

No levantamento de dados e informações foi realizada uma pesquisa de campo de 3 dias, em março de 2016 na cidade de Juazeiro do Norte. A visita foi planejada e marcada

antecipadamente com o Superintendente da Autarquia Municipal do Meio Ambiente de Juazeiro do Norte, Eraldo Oliveira, e o Diretor de Monitoramento Ambiental, André Wirtzbiki. Como instrumento de coleta foi utilizado o questionário 01 (ver apêndice A) que foi aplicado com representantes da AMAJU, da associação de materiais recicláveis e do aterro controlado do município (Palmeirinha).

Atividades da pesquisa de campo:

- (Dia 01) Visita à SEMASP/AMAJU- O questionário de pesquisa foi respondido pelo Diretor de Monitoramento Ambiental da AMAJU, o qual também disponibilizou vários documentos que possuíam dados e informações sobre o sistema de gestão de RSU do município;
- (Dia 02) Visita ao aterro da Palmeirinha – Primeiramente, o Superintendente da AMAJU respondeu perguntas pendentes e depois, no aterro controlado do município, foi aplicado o questionário aos 2 empregados do aterro controlado;
- (Dia 03) Visita à associação de catadores Engenho do Lixo – O questionário de pesquisa foi aplicado ao único catador da associação Engenho do Lixo que estava presente no momento.

Após a coleta, tabulação e análise de dados, as etapas de gestão de RSU são caracterizadas e o fluxo geral dos RSU é apresentado de acordo com orientações da metodologia sistêmica SSM de Checkland (1981).

Figura 12: Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos de Juazeiro do Norte



Fonte: Autor

b) Diagnóstico e prognóstico do sistema de RSU

O Diagnóstico e Prognóstico do Sistema de RSU tem o objetivo de identificar problemas no sistema e obter uma visão ampla dos resultados da atual gestão de RSU de Juazeiro do Norte. Orientações das etapas 3 e 4 da metodologia sistêmica SSM de Checkland (1981) são utilizadas e as informações levantadas na etapa anterior são comparadas com definições e objetivos da PNRS e dados de outras regiões. Em seguida, através de técnicas de projeção, são apresentados diferentes resultados do sistema em um período de 20 anos, 2016 a 2035.

c) Definição da estrutura hierárquica AHP

Essa etapa apresenta os três primeiros passos do método AHP. O objetivo geral do método AHP é definido a partir dos principais objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos e, logo após, os critérios de avaliação utilizados são apresentados. São definidas e descritas características de 5 diferentes alternativas de mudanças para o tratamento dos RSU da região. As alternativas apresentadas são baseadas em boas práticas presentes no Brasil e no Mundo e mesclam opções de tratamento mecânico, biológico e térmico, sendo divididas em modelos centralizado, descentralizado e misto. Por fim, a estrutura hierárquica AHP é criada. Os critérios econômico, ambiental, social, técnico e regulatório foram escolhidos com base em Chang e Pires (2015). Dentre os vários subcritérios apontados por esses autores, foram escolhidos 8 que se julgou serem eficientes para avaliar as alternativas e factíveis de coleta e mensuração.

d) Avaliação das alternativas

Os valores dos critérios e subcritérios foram obtidos através de técnicas de projeção e estudos realizados por órgãos e institutos Ministério das Cidades, Banco Mundial, CEMPRE, IPEA, WWF e FADE, e trabalhos acadêmicos (dissertações, teses e artigos científicos). Nessa etapa, os valores quantitativos e qualitativos foram comparados entre as alternativas e, depois, ponderados em uma escala de 0 a 100%.

e) Avaliação do peso dos critérios e subcritérios

Essa etapa tem o objetivo de mensurar o grau de importância de cada um dos critérios e subcritérios. Os pesos dos critérios e subcritérios foram avaliados por oito especialistas da área de gestão de RS de diferentes instituições e órgãos (ver quadro 3).

Quadro 3: Especialistas participantes da avaliação

Número de especialistas	Órgão/instituição
1	Universidade Federal do Ceará - UFC
1	HQ Engenharia
1	Secretaria das Cidades do Ceará
1	Ecoletas
1	Instituto Consciência
1	ALS Bio Energy Corp.
1	Secretaria Estadual do Meio Ambiente CE - SEMA
1	Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior do Ceará - SECITECE

Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa etapa, através do questionário 02 (ver apêndice B), os especialistas compararam todos os critérios par a par com o apoio da escala fundamental de Saaty (1980). Já em relação aos subcritérios, os especialistas seguiram o mesmo procedimento para os subcritérios econômico e ambiental.

f) Análise dos resultados

O *Software SuperDecisions*[®] foi utilizado na aplicação do método AHP. Os pesos definidos nas etapas anteriores são inseridos no *Software*, o qual avalia todas as alternativas de forma global e aponta a alternativa ideal. O resultado final é julgado através da análise de sensibilidade feita com o auxílio do *Software*.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo de explicitar a aplicação da abordagem metodológica proposta ao atual sistema de gestão dos RSU na região de Juazeiro do Norte. A aplicação da metodologia é composta por seis etapas e possui como principais produtos o diagnóstico e a proposição de soluções para o sistema com foco nas unidades de tratamento de resíduos.

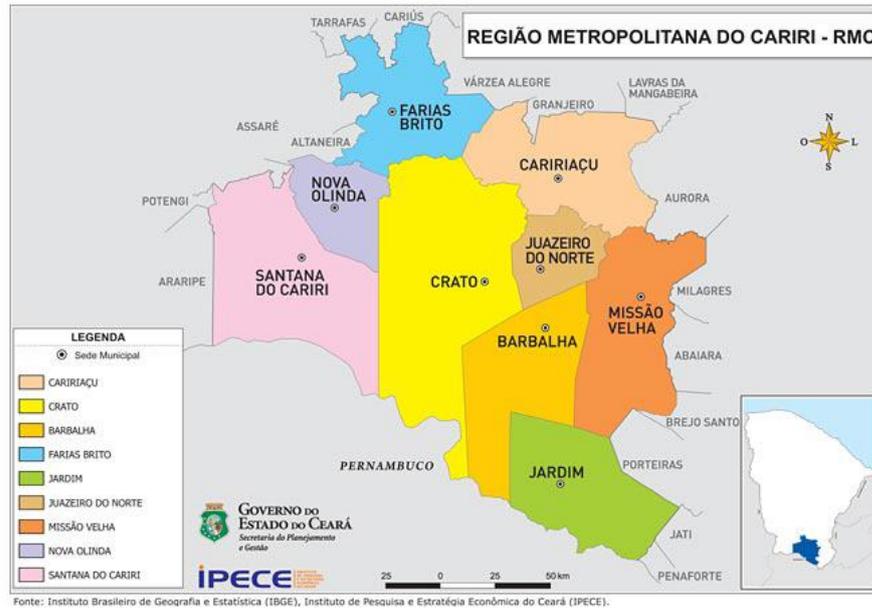
5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A etapa de contextualização e caracterização do objeto de estudo apresenta informações básicas e características do fluxo de resíduos sólidos urbanos do município e está dividida em duas partes: i) Informações gerais de Juazeiro do Norte; e ii) Sistema de gestão de RSU de Juazeiro do Norte. As principais fontes de dados/informações e referências bibliográficas foram o Questionário 01 aplicado na pesquisa de campo, estudos de diversas fontes (dados secundários) e as teorias de abordagem sistêmica e definições fundamentais na gestão de RS.

5.1.1 Informações gerais de Juazeiro do Norte

Juazeiro do Norte é um dos municípios da Região Metropolitana do Cariri (RMC) que se situa no sul cearense e pertence à macrorregião do Cariri (42 municípios). Além de Juazeiro do Norte, a RMC é formada por mais oito municípios: Crato, Barbalha, Jardim, Missão Velha, Caririaçu, Farias Brito, Nova Olinda e Santana do Cariri (ver Figura 13).

Figura 13: Localização da Região Metropolitana do Cariri



Fonte: IPECE (2012)

O IBGE (2015) estima que a RMC possua atualmente 594.237 habitantes distribuídos em 5.460 km², tendo o município de Juazeiro do Norte (248,8 km²) a maior população e a maior densidade populacional, 266.022 habitantes (3ª maior população municipal do Ceará) e 1.069 hab/km², respectivamente. Segundo o IBGE (2010) o município de Juazeiro do Norte possuía, em 2010, cerca de 69.000 domicílios, sendo em sua grande maioria casas (97,7%).

No âmbito da Economia, Juazeiro do Norte possui grande influência no Estado, essencialmente no sul do Ceará, que faz divisa com os Estados do Piauí, Paraíba e Pernambuco. O setor primário tem pouca influência e um dos principais motivos é a alta taxa de urbanização (95,3%), já o setor secundário (3º maior polo brasileiro de calçados) e terciário são mais desenvolvidos, sendo as atividades terciárias as principais da sua economia. De acordo com o IBGE (2015), Juazeiro do Norte possui grande expressividade no PIB do Estado (5º maior do Estado), sendo responsável por, aproximadamente, 2,61% (cerca de R\$ 2,4 bilhões).

5.1.2 Sistema de gestão de RSU de Juazeiro do Norte

Um sistema de gestão de resíduos sólidos é dividido nas etapas de geração, coleta e transporte, tratamento e RUL (CHRISTENSEN, 2011), as quais, de acordo com o conceito de subsistemas de Athey (1982), também podem ser consideradas subsistemas do sistema de gestão de RS. As etapas possuem peculiaridades que geram interações entre si e com outros

sistemas do meio; logo, cada uma destas etapas no município de Juazeiro do Norte pode ser caracterizada individualmente e, ao final, seguindo a etapa 2 da metodologia SSM de Checkland (1981), pode-se apresentar um esquema geral do atual fluxo de RSU.

a) Geração de RSU

Na pesquisa de campo, foi constatado que não existe estudo primário que estime a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados pelo município. O presente estudo utilizou a taxa de geração por unidade (kg/dia/habitante) sugerido por Christensen (2011) para estimar a geração de RSU.

Partindo da premissa de que a taxa de geração da região é igual à taxa média do Nordeste - 0,982 kg/hab/dia (ABRELPE, 2015) - os 266.022 habitantes de Juazeiro do Norte (IBGE, 2015) geram um total de 261 toneladas de RSU por dia, ou seja, 95.350 toneladas por ano (ver quadro 4).

Quadro 4: Cálculo da geração de RSU em Juazeiro do Norte (2015)

DADOS BASE			PROJEÇÃO		
POPULAÇÃO ESTIMADA DE JUAZEIRO DO NORTE 2015 (IBGE, 2015)		266.022	PROJEÇÃO DE GERAÇÃO ANUAL DE RSU EM JUAZEIRO DO NORTE (Ton./Ano)		
TAXA DE GERAÇÃO DE RSU NO NORDESTE (ABRELPE, 2015)		0,982 kg/hab/dia			
COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DE JUAZEIRO DO NORTE (SEMASP, 2012)			POR TIPO		TOTAL
RECICLÁVEIS	METAL	4,00%	3.814	33.373	95.350
	PAPEL	17,00%	16.210		
	PLÁSTICO	11,00%	10.489		
	VIDRO	3,00%	2.861		
NÃO-RECICLÁVEIS	MATÉRIA ORGÂNICA	57,00%	54.350	61.978	
	OUTROS	8,00%	7.628		

Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação a composição gravimétrica, estima-se que, destas 95.350 toneladas, 33.373 são recicláveis e 61.978 são não-recicláveis, sendo 3.814 t de metal, 16.210 t de papel, 10.489 t de plástico, 2.861 t de vidro, 54.350 t de matéria orgânica e 7.628 t de outros tipos de material.

b) Etapa de coleta e transporte

A coleta e transporte de RSU é realizada, principalmente, por uma empresa terceirizada que recebe um valor anual (R\$ 17.459.249,40 em 2014) para prestar serviços de coleta e transporte de resíduos domiciliares, de varrição e poda de árvores, compreendendo também os serviços de varrição, capinação e poda de árvores. A coleta não é seletiva, praticamente não há separação dos RSU na origem. Os resíduos de limpeza urbana são coletados por caçambas, enquanto os resíduos domiciliares são coletados através de caminhões compactadores.

A coleta é dividida em 26 zonas geradoras e realizadas conforme frequência pré-determinada (ver quadro 5). Os veículos coletam os RSU das zonas até ficarem cheios e depois seguem para o aterro controlado do município (Palmeirinha) para despejá-los; esta operação é realizada várias vezes até coletar os RSU de todas as 26 zonas geradoras. Funcionários do aterro controlado da Palmeirinha apontam que a empresa coleta, transporta e despeja, aproximadamente, 235* toneladas de RSU por dia; como o único destino dos resíduos coletados é o aterro controlado, calcula-se que em torno de 90% dos RSU gerados em Juazeiro do Norte são coletados pela empresa terceirizada.

* Valor não pesado.

Quadro 5: Frequência de coleta nas fontes geradoras de RSU

ZONAS GERADORAS DE LIXO	SEGUNDA		TERÇA		QUARTA		QUINTA		SEXTA		SÁBADO		DOMINGO	
	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO
GRUPO - ZGLDN (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA DIUTURNO)														
ZGLDN.DN.01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ZGLDN.DN.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GRUPO - ZGLD (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA DIÁRIA)														
ZGLD.N.03		1		1		1		1		1		1		
ZGLD.N.04		1		1		1		1		1		1		
GRUPO - ZGLA (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA ALTERNADAS)														
ZGLAP.D.05	1				1					1				
ZGLAP.D.06	1				1					1				
ZGLAP.D.07	1				1					1				
ZGLAP.D.08	1				1					1				
ZGLAP.D.09	1				1					1				
ZGLAP.D.10	1				1					1				
GRUPO - ZGLA (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA ALTERNADAS)														
ZGLAP.N.11		1				1				1				
ZGLAP.N.12		1				1				1				
ZGLAP.N.13		1				1				1				
ZGLAP.N.14		1				1				1				
GRUPO - ZGLA (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA ALTERNADAS)														
ZGLAI.D.15			1				1				1			
ZGLAI.D.16			1				1				1			
ZGLAI.D.17			1				1				1			
ZGLAI.D.18			1				1				1			
ZGLAI.D.19			1				1				1			
ZGLAI.D.20			1				1				1			
GRUPO - ZGLA (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA ALTERNADAS)														
ZGLAI.N.21				1				1				1		
ZGLAI.N.22				1				1				1		
ZGLAI.N.23				1				1				1		
ZGLAI.N.24				1				1				1		
GRUPO - ZGLEX (ZONA GERADORA DE LIXO COM COLETA EXTRAS)														
ZGLSS.D.25	1									1				
ZGLSS.D.26					1									
ZONAS GERADORAS DE LIXO														
	SEGUNDA		TERÇA		QUARTA		QUINTA		SEXTA		SÁBADO		DOMINGO	
	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO	DIURNO	NOTURNO
TOTAL DE EQUIPES	9	8	8	8	9	8	8	8	9	8	8	8	2	0

Fonte: SEMASP (2013)

Os catadores de materiais recicláveis, avulsos ou integrantes de associação, também participam da coleta e transporte dos RSU do município. O principal montante coletado é da Associação de Catadores Engenho do Lixo, que possui 36 associados e coleta aproximadamente 60** toneladas de materiais recicláveis por mês (2 toneladas por dia). Partindo da premissa que os demais catadores coletem metade do que a Associação Engenho do Lixo coleta, estima-se que no total os catadores sejam responsáveis por coletarem, na origem, em torno de 3 toneladas por dia (cerca de 1% dos RSU gerados).

No transporte dos materiais, utiliza-se principalmente carrinho de mão e um caminhão, com aluguel pago pela prefeitura, para levá-los até a sede da associação e vendê-los. Os catadores vendem os resíduos recicláveis para pessoa física, empresas e depósitos (atravessadores), sendo estes últimos os principais compradores.

Não existem ecopontos de RSU funcionando***; no entanto, há projeto padrão para construção de 3 ecopontos, que receberão diversos tipos de resíduos sólidos urbanos, desenvolvido pelo Instituto de Desenvolvimento Institucional das Cidades – IDECI.

c) Etapa de tratamento

O atual sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte não possui unidades de tratamento mecânico, térmico ou biológico. A principal triagem existente é realizada no aterro, de forma manual e sem infraestrutura, por cerca de 100 catadores avulsos.

Segundo AMAJU, está sendo estudado a possibilidade de implantar uma unidade de biodigestão para tratar os RSU orgânicos de Juazeiro do Norte.

d) Etapa RUL – Reciclagem/Utilização/Disposição final

No município existe uma empresa de reciclagem e uma de reutilização de caixas de papelão. A primeira empresa recicla, principalmente, plástico e produz produtos como bacias, vassouras e rodos. Cidades próximas - como Quixadá (CE), Crato (CE), Caruaru (PE) e Arco Verde (PE) - também possuem mercado que compra parte do material reciclável de Juazeiro do Norte para transformação.

** Valor estimado por funcionário da Associação de Catadores Engenho do Lixo.

*** Levantamento realizado em março de 2016.

Os valores de venda dos materiais recicláveis variam por tipo de material e por região. No quadro 6 são apresentados os principais materiais vendidos pela Associação de Catadores Engenho do Lixo.

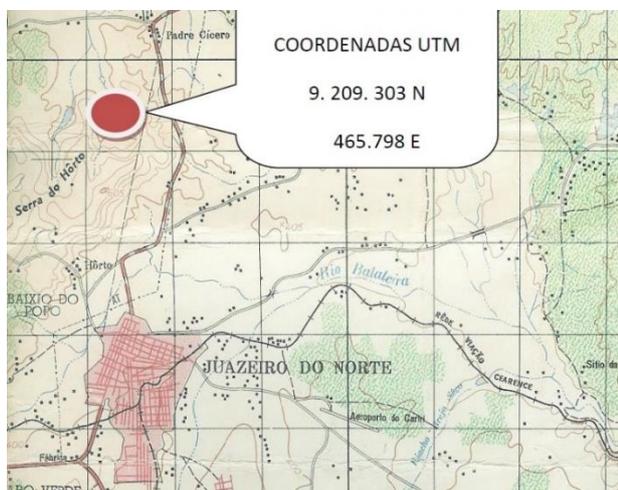
Quadro 6: Valores dos materiais recicláveis vendidos pela Associação Engenho do Lixo

Tipo de material	Material reciclável	Valor de venda mês base março 2016 (r\$/kg)
METAL	Ferro	0,15
	Alumínio	3,00
	Cobre	10,00
	Aço	3,00
PLÁSTICO	Plástico PET	0,70
	Plástico Filme	0,25
	PVC	0,15
PAPEL	Papelão	0,12
	Papel Branco	0,12
	Papel Misto	0,06
VIDRO	Vidro	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor

A disposição final dos RSU é realizada no aterro controlado do Palmeirinha, que fica localizado nas margens da rodovia estadual CE-060 (ver Figura 14).

Figura 14: Localização do aterro controlado de Juazeiro do Norte



Fonte: SEMASP (2013)

Como já mencionado, o aterro controlado recebe uma média de 235 toneladas de RSU por dia; possui área de 50.000 m² onde trabalham 2 funcionários da prefeitura e, aproximadamente, 100 catadores avulsos. Os catadores improvisam abrigos no aterro controlado, próximos de onde realizam a atividade de catação de materiais no momento em que o caminhão despeja os resíduos (ver Figuras 15 e 16).

Figura 15: Abrigo dos catadores no aterro controlado de Juazeiro do Norte



Fonte: Autor

Figura 16: Despejo dos RSU no aterro controlado de Juazeiro do Norte



Fonte: Autor

Segundo os funcionários do aterro controlado, cerca de 20%**** do que é depositado (47 toneladas por dia) são triados e vendidos pelos catadores e o restante (188 toneladas por dia) é enterrado no próprio aterro. O aterro do município do Palmeirinha existe há 11 anos e evoluiu, nos últimos anos, de lixão para aterro controlado.

**** Valor não pesado.

Figura 17: Material reciclável separado e embalado



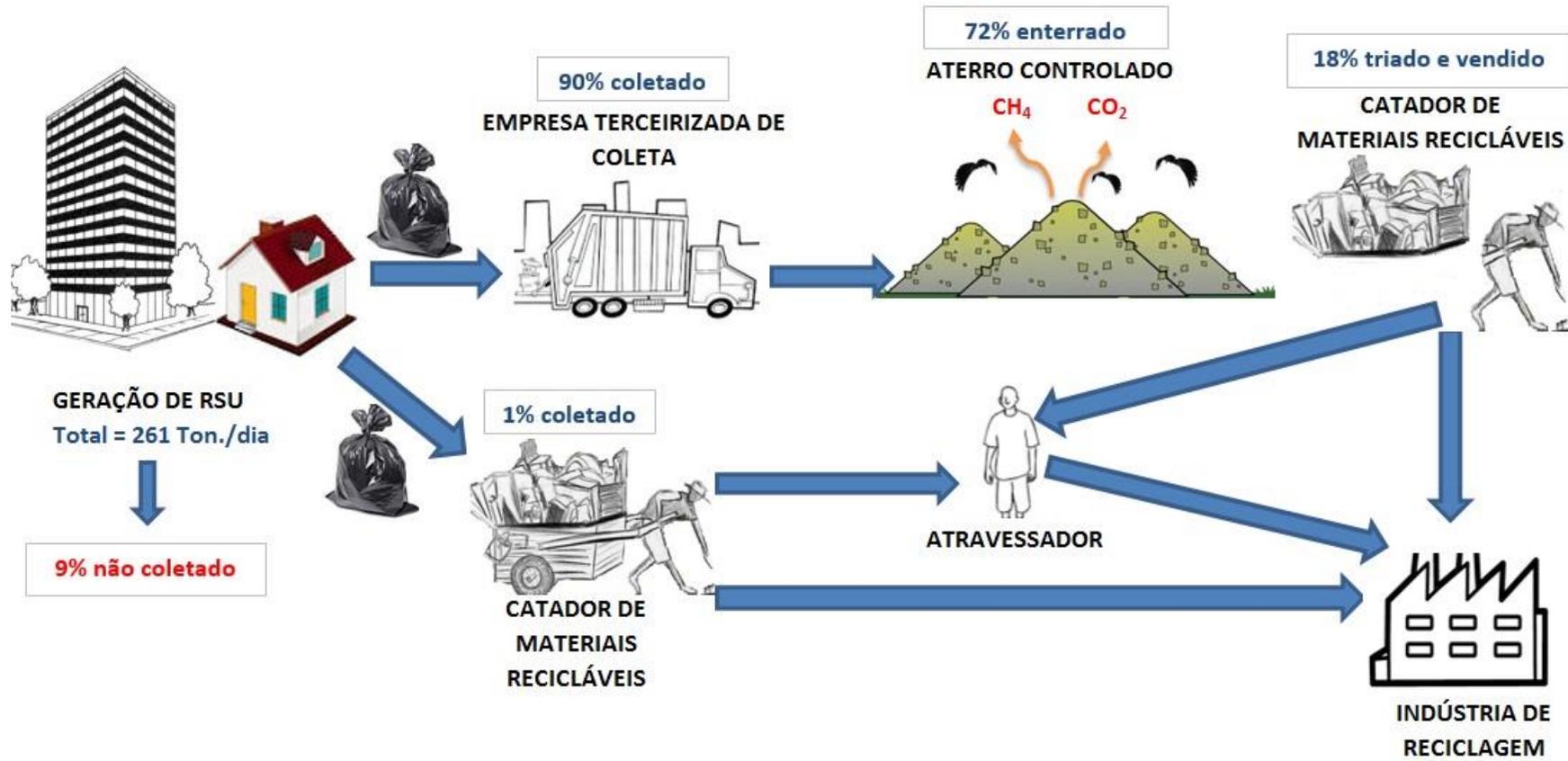
Fonte: Autor

e) Representação geral do fluxo de RSU

A Figura 18 apresenta uma visão geral do fluxo de RSU desde a geração até a etapa de reciclagem/utilização/disposição final.

Na Figura 18 é possível observar que, do total de RSU gerado no município, aproximadamente 90% é coletado pela empresa terceirizada e segue para o aterro controlado de Palmeirinha e 1% é coletado na origem por catadores (avulsos ou associados); já os outros 9% são considerados como não coletados. Parte dos resíduos que chega no aterro são triados no local por catadores e vendidos para reciclagem (18% do RSU gerado). Entretanto, a grande maioria (72% do RSU gerado) é enterrada no aterro controlado do município. Os resíduos coletados pelos catadores na origem são, assim como os coletados nos aterros, vendidos diretamente ou indiretamente para a indústria de reciclagem.

Figura 18: Fluxo dos RSU de Juazeiro do Norte



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2 DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DO SISTEMA DE RSU

Essa etapa tem o objetivo de identificar problemas e obter uma visão ampla de resultados futuros da atual gestão de RSU de Juazeiro do Norte. O diagnóstico seguiu orientações dos passos 3 e 4 da metodologia de análise sistêmica (SSM) de Checkland (1981). A caracterização, realizada na etapa anterior, é comparada com as definições, objetivos e princípios da PNRS destacando-se problemas da atual gestão. Em seguida, através de técnicas de projeção, é estimado o desempenho futuro do sistema de gestão de RSU do município caso não haja intervenção de mudança. Os seguintes diagnóstico e prognóstico são sistêmicos porque abordam diversos subsistemas da gestão de RS e diferentes âmbitos como social, econômico, ambiental e político.

5.2.1 Diagnóstico

A PNRS foi escolhida como o modelo conceitual, para ser comparado com a atual gestão de RSU de Juazeiro do Norte, por ser um instrumento normativo, possuir uma visão sistêmica e um conjunto de objetivos e princípios adotados pelo Governo Federal com vista à gestão/gerenciamento adequada dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

1. Coleta e transporte

O Art. 9º da PNRS (BRASIL, 2010) destaca a importância da coleta seletiva para a gestão adequada dos RS; entretanto, a coleta do município de Juazeiro do Norte não é seletiva. Praticamente não existe triagem na origem, a empresa deposita todo RSU coletado no aterro controlado e, somente lá, são triados por catadores.

Ao comparar a quantidade de RSU coletada pela empresa de limpeza com as médias brasileiras divulgadas pela ABRELPE (2015), percebe-se que a coleta está acima da média do Nordeste - 90% contra 78,5% -, sendo este valor igual a média do País (90%), entretanto, está até 7% abaixo da média de regiões consideradas mais desenvolvidas como o Sudeste (97%).

No âmbito social, a prefeitura apresenta-se ativa na inclusão social e produtiva dos catadores de materiais recicláveis, um dos objetivos da PNRS, com iniciativas como o pagamento do aluguel do caminhão da Associação Engenho do Lixo, e a compra e distribuição de equipamentos de proteção individuais (EPI). Apesar disso, os catadores sofrem dificuldades

e falta uma maior integração entre os atores do sistema. Por exemplo, aproximadamente 100 catadores trabalham em condições impróprias no aterro e, em algumas situações, a baixa disponibilidade de material faz com que os catadores avulsos e associados tenham pequeno poder de comercialização vendendo os materiais para atravessadores por valores abaixo do mercado.

2. Tratamento

Segundo a PNRS, o tratamento dos RSU é prioridade em relação à disposição final. No entanto, não existem unidades de tratamento no município, o que demonstra um problema sistêmico de hierarquia, tendo como consequência que resíduos com valor econômico e com alto impacto ambiental negativo seguem para disposição final no aterro controlado de Palmeirinha. Isto apesar do incentivo da adoção de tecnologias de tratamento como forma de otimizar os sistemas de gestão de RS, que é um dos objetivos da PNRS (BRASIL, 2010).

3. RUL

A reciclagem, 4º nível de prioridade da PNRS, apresenta necessidade de melhorias. Ao considerar que 35% (91 toneladas por dia) dos RSU gerados são recicláveis (SEMASP, 2013), calcula-se que quase a metade (16%) dos materiais recicláveis são “perdidos” ao longo da cadeia de resíduos sólidos urbanos. Praticamente não existe triagem na origem, a coleta da empresa não é seletiva e não existem centros de triagem antes da disposição no aterro, isso tudo prejudica a eficiência na reciclagem.

Dados da disposição final apresentam um cenário preocupante. O município enterra aproximadamente 72% dos RSU gerados, ou seja, mais de 2/3 dos resíduos sólidos urbanos de Juazeiro do Norte estão sendo destinados ao último nível de prioridade da PNRS, a disposição final. Isto vai contra vários objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), tais como:

- Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental – os resíduos não recebem tratamento e são enterrados, o que gera altos índices de poluição do ar e da água, grande ocupação de área, alto risco sanitário/saúde, altos riscos de segurança, entre outros (YAP & NIXON, 2015);

- Incentivo à indústria da reciclagem – resíduos recicláveis com valor econômico são enterrados;

- Incentivo à adoção de tecnologias de tratamento como forma de otimizar os sistemas de gestão de RS – benefícios ambientais (ex: diminuição de volume e contaminantes dos resíduos), econômicos (ex.: geração de energia) e sociais (ex.: geração de emprego) são perdidos ao não tratar e enterrar os resíduos (CHRISTENSEN, 2011).

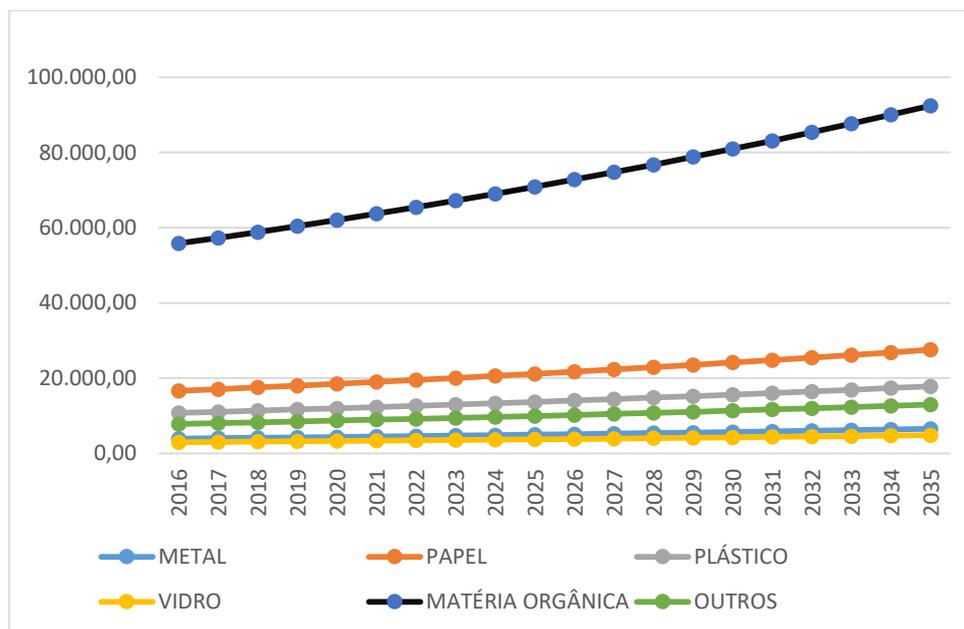
5.2.2 Prognóstico

O seguinte prognóstico projeta o desempenho futuro do sistema de gestão de RSU da região, caso não haja intervenção de mudança. Para isso, projetou-se a área ocupada por aterro (fórmula 1) e a emissão de CH₄ e CO₂ (fórmula 2 - *Software Landgem*), em um período de 20 anos (2016 a 2035). Os resultados obtidos nesta etapa servem de *feedback* para avaliar melhor o sistema e dão suporte para a proposição de mudanças ao compará-los com resultados de outras alternativas.

a) Projeção de geração de RSU

O gráfico 6 mostra a projeção da quantidade de RSU gerado em Juazeiro do Norte nos próximos 20 anos. Esses valores são dados de entrada essenciais para projetar os resultados do sistema em estudo. O cálculo desses valores considerou a taxa média de crescimento anual de geração de RSU no Ceará. O valor médio de 2,69% foi calculado através das taxas dos anos de 2010 até 2014, apontadas pela ABRELPE (2012; 2013; 2014; 2015).

Gráfico 6: Projeção de geração de RSU em Juazeiro do Norte - 2016 a 2035 (toneladas/ano)



Fonte: Elaborada pelo autor

Estima-se que a geração de RSU de Juazeiro do Norte entre 2016 até 2035 cresça de 95.350 toneladas por ano para 162.172 toneladas por ano, ou seja, um aumento de 70% nos próximos 20 anos. Como a composição gravimétrica foi mantida constante nesta projeção, a matéria orgânica continuará sendo o principal tipo de RSU produzido pela região, chegando a um total de 92.438 toneladas no ano de 2035; no mesmo ano, serão geradas 56.760 toneladas de resíduos recicláveis.

b) Projeção área ocupada por aterro

Para o cálculo da área ocupada pelos resíduos sólidos urbanos nos próximos 20 anos, utilizou-se a fórmula (1) apresentada por Younes *et al* (2015).

$$\text{Área} = R \times L \times \text{Pop} \times 1,5 / (\rho_{\text{bulk}} \times H) \quad (1)$$

Na pesquisa, contabilizou-se somente o RSU coletado e enterrado (ver quadro 7). Em relação a taxa de geração *per capita* de RSU (R), utilizou-se a média anual de habitantes no período (população de 280.266 habitantes), calculada a partir das taxas de crescimento populacional do Ceará do IBGE (2013); e a geração anual média (127.495 toneladas por ano),

calculada através dos dados projetados anteriormente. A taxa de geração *per capita* encontrada foi de 455 kg/hab/ano, mas como somente 72% é coletado e enterrado, foi utilizada na projeção a taxa de 328 kg/hab/ano.

Quadro 7: Projeção de RSU enterrado no aterro controlado de Juazeiro do Norte (tonelada por ano)

2016	2017	2018	2019	2020
70.500	72.397	74.345	76.346	78.400
2021	2022	2023	2024	2025
80.510	82.677	84.902	87.186	89.533
2026	2027	2028	2029	2030
91.942	94.416	96.957	99.566	102.246
2031	2032	2033	2034	2035
104.997	107.823	110.724	113.704	116.764

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores dos parâmetros L, ρ_{bulk} e H foram definidos através das recomendações do estudo de Younes *et al* (2015). De acordo com esses autores, o valor de 800 kg/m³ é comumente usado como densidade média dos resíduos (ρ_{bulk}) em diversos estudos na área; o valor da altura das montanhas de resíduos (H) deve variar entre 15 e 30 metros (usou-se o valor médio de 22,5 metros); já o tempo médio mais comum de utilização de um aterro/lixão é 20 anos (L).

Logo, o cálculo da área ocupada para a disposição de resíduos sólidos urbanos no aterro controlado em Juazeiro do Norte é de:

$$\text{Área} = 328 \times 20 \times 280.266 \times 1,5 / (800 \times 22,5);$$

$$\text{Área} = 153.212 \text{ m}^2 = 15,32 \text{ hectares.}$$

Ao final do cálculo chega-se à conclusão de que, caso o atual nível de desempenho de gestão se mantenha, os RSU coletados e enterrados em Juazeiro do Norte, nos próximos 20 anos, ocuparão uma área total equivalente ao espaço ocupado por, aproximadamente, 22 campos de futebol.

c) Projeção de emissão de CH₄ e CO₂

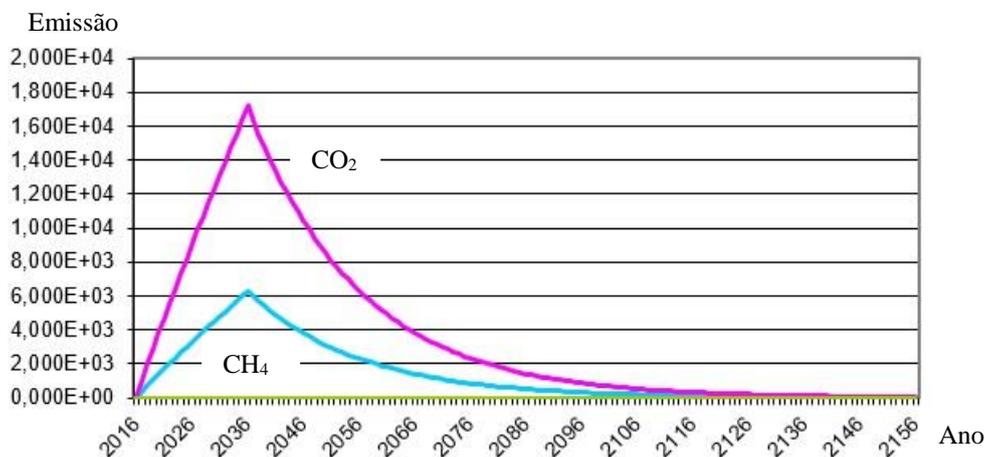
Utilizou-se o modelo da USEPA (2005) - chamado de *LandGEM* - para projetar as emissões de gás metano e gás carbônico gerados pelos resíduos enterrados no aterro.

Esta pesquisa adotou os critérios da USEPA (2005) que define os valores padrões de $k = 0,05$ (ano⁻¹); $L_0 = 170$ (m³/Mg); concentração de NMOC = 600 (ppmv hexano) considerando a inexistência de resíduos perigosos e volume de metano = 50%. Em relação a quantidade de RSU enterrada no aterro (M_i) foi inserido os valores encontrados com base no Quadro 7.

Ao final da aplicação do modelo *LandGEM*, chegou-se aos valores de emissão de gases mostrados no Gráfico 7.

Como no aterro controlado de Juazeiro do Norte não existe a captura dos gases gerados a partir dos RSU, considerou-se que todo o gás produzido é disposto no ambiente. Logo, estima-se que, nos próximos 20 anos, o RSU enterrado no aterro emitirá um total aproximado de 74.453 toneladas de gás metano (média de 3.722 toneladas por ano) e 204.283 toneladas de gás carbônico (média de 10.214 toneladas por ano). Além disso, constata-se que, mesmo depois de desativado no final do ano de 2035, o aterro ainda será gerador de gases de efeito estufa por várias décadas, chegando a emitir um total de 159.341 toneladas de gás metano e 437.195 toneladas de gás carbônico entre os anos de 2016 a 2056, provenientes dos RSU coletados e enterrados entre 2016 e 2035 (ver gráfico 7). Logo, ao dividir o total da emissão pela quantidade de anos que foram gerados esses resíduos (20 anos), são emitidos nesse cenário anualmente, aproximadamente, 7.967 toneladas de gás metano e 21.860 toneladas de gás carbônico.

Gráfico 7: Estimativa de geração de CH₄ e CO₂ a partir dos RSU enterrados nos próximos 20 anos em Juazeiro do Norte (tonelada por ano)



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA (AHP)

Esta etapa apresenta os três primeiros passos do método AHP. O objetivo geral do método AHP é definido e, logo após, os critérios de avaliação utilizados são apresentados. Apontam-se cinco diferentes alternativas de mudança para o tratamento dos RSU da região e são descritas suas características em relação aos critérios. As alternativas apresentadas são baseadas em boas práticas presentes no Brasil e no Mundo e mesclam opções de tratamento mecânico, biológico e térmico, sendo divididas em modelos centralizado, descentralizado e misto. Por fim, a estrutura hierárquica AHP é criada.

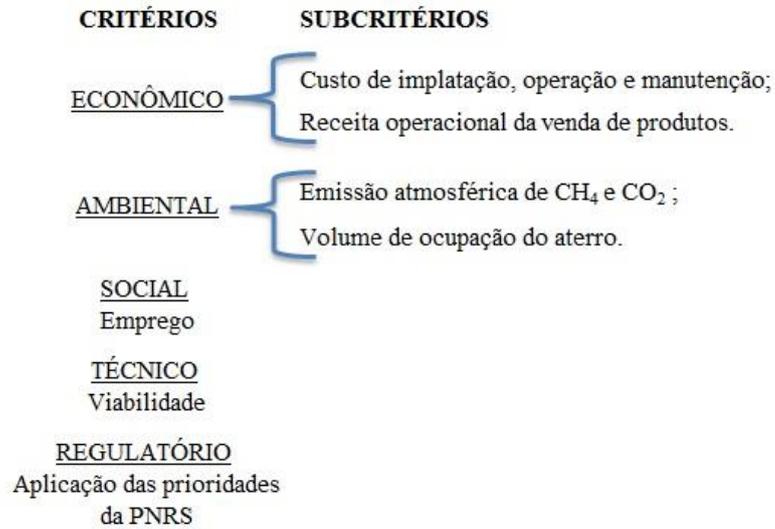
5.3.1 Objetivo geral

Um dos principais problemas, destacado pelo diagnóstico do atual sistema de gestão de RSU de Juazeiro do Norte, é o problema sistêmico hierárquico, no qual resíduos são destinados à disposição final sem passar por unidades de tratamento, indo contra definições e objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Com o intuito de resolver este problema e otimizar de forma sistêmica os resultados do sistema, colocou-se como objetivo do método AHP: “Definir a alternativa de tratamento de RSU mais sustentável e que esteja em consonância com a Lei Federal 12.305.”

5.3.2 Critérios e subcritérios de avaliação

Os critérios e subcritérios de avaliação foram escolhidos com base nos cinco critérios de sustentabilidade apontados por Chang e Pires (2015). Nessa escolha, a disponibilidade de dados e informações nos diversos tipos de tratamento foi fator decisivo.

Figura 19: Critérios e subcritérios de avaliação



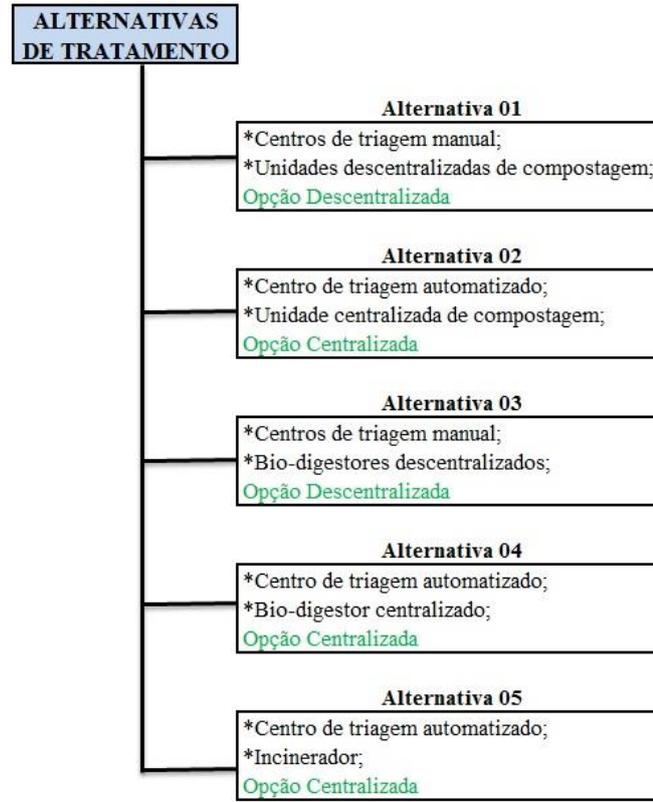
Fonte: Elaborada pelo autor

Foram levados em consideração os critérios econômico, ambiental, social, técnico e regulatório, sendo os dois primeiros divididos em dois subcritérios cada. O critério econômico aborda a receita operacional gerada pela venda de produtos das unidades de triagem/tratamento e a soma dos custos de implantação, operação e manutenção. O critério ambiental analisa as emissões de gases carbônico e metano no ambiente, bem como o volume de ocupação do aterro nas alternativas. Já os critérios social, técnico e regulatório referem-se, respectivamente, ao número de empregos diretos gerados, à viabilidade da alternativa (possibilidade de sucesso) e ao grau de conformidade da alternativa à aplicação das seis prioridades da PNRS.

5.3.3 Alternativas de tratamento de RSU

As alternativas de tratamento de RSU apresentadas são baseadas em boas práticas presentes no Brasil e no Mundo (Capítulo 3) e mesclam unidades de tratamento mecânico, biológico e térmico, sendo divididas em modelos centralizado e descentralizado (ver Figura 20).

Figura 20: Alternativas de tratamento de RSU



Fonte: Elaborada pelo autor

As cinco alternativas possuem características diferentes. As influências sobre os critérios analisados (ver quadro 8) foram obtidas a partir de dados e informações de estudos realizados por órgãos e institutos como Ministério das Cidades, Banco Mundial, CEMPRE, IPEA, WWF e FADE, e trabalhos acadêmicos (dissertações, teses e artigos científicos).

Quadro 8: Características de diferentes unidades de tratamento de RSU

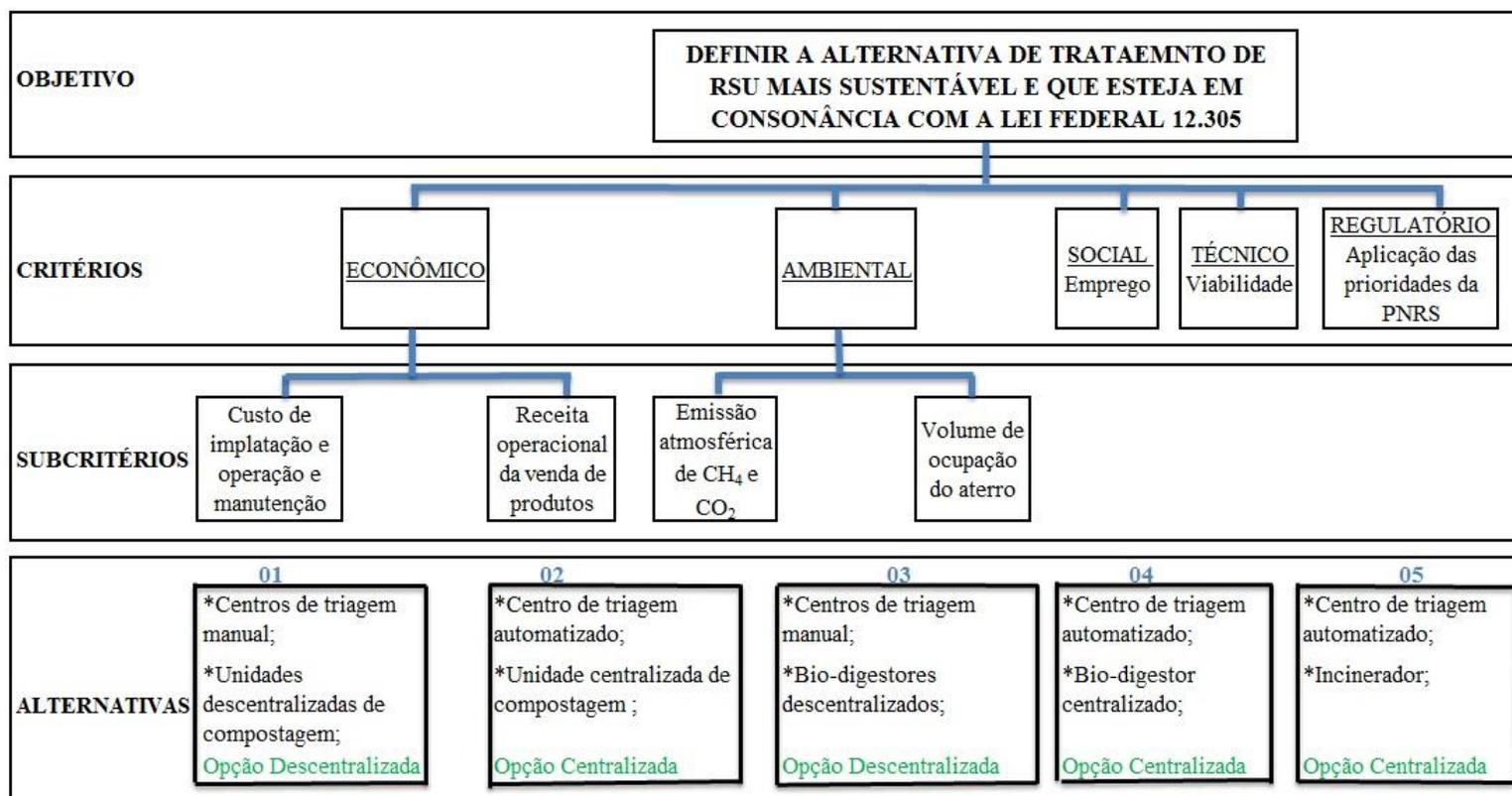
		CARACTERÍSTICAS DO TRATAMENTO						
		Centro de triagem		Unidade de Compostagem		Bio-digestor (com compostagem)		Incinerador
		Manual	Automatizado	Descentralizada	Centralizada	Descentralizada	Centralizada	Centralizado
CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO →		10mil - 30mil habitantes	250mil-1milhão habitantes	10mil - 30mil habitantes	250mil-1milhão habitantes	66 toneladas de RSU/dia	225 toneladas de RSU/dia	650 toneladas de RSU/dia
CRITÉRIO	SUBCRITÉRIO							
Econômico	Custos de implantação e operação e manutenção (RS/ton.)	502,5	179,5	86	84,3	137,12	85,54	204,19
	Receita operacional da venda de produtos (RS)	Venda do material reciclável	Venda do material reciclável	Venda do Composto	Venda do Composto	Venda da energia elétrica + Venda do composto	Venda da energia elétrica + Venda do composto	Venda da energia elétrica
Ambiental	Emissão atmosférica de CH₄ e CO₂ (Ton.)	Não emite CH ₄	Não emite CH ₄	0,004 e 0,010 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente	0,004 e 0,010 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo tratado, na base úmida e na base seca respectivamente	Entre 0 e 411e-6 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	Entre 0 e 411e-6 toneladas de CH ₄ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	Não emite CH ₄
		Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Não emite CO ₂	Entre 0,181 e 0,520 toneladas de CO ₂ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	Entre 0,181 e 0,520 toneladas de CO ₂ para cada tonelada de resíduo orgânico tratado	0,415 toneladas de CO ₂ para cada tonelada de RSU tratada
	Volume de ocupação do aterro (m²)	Reduz 100% do resíduo triado e reciclado	Reduz 100% do resíduo triado e reciclado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz 100% do resíduo orgânico tratado	Reduz entre 80% e 90% do resíduo tratado
Social	Empregos	50 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	10 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	14 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	4 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	28 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	8 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas	1 empregos para cada 10 mil toneladas anuais de RSU tratadas
Técnico	Viabilidade	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Muito baixa
Regulatório	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.4 Estrutura hierárquica

Ao final, o problema de tomada de decisão na escolha da melhor alternativa é decomposto em uma estrutura de níveis hierárquicos (ver Figura 21).

Figura 21: Estrutura hierárquica AHP



Fonte: Elaborada pelo autor

Para alcançar o objetivo do Estudo, deve-se analisar a influência que cada uma das cinco alternativas tem sobre os critérios social, técnico e regulatório bem como sobre os subcritérios econômicos de custo e receita, e os subcritérios ambientais de emissão de GEE e volume de ocupação do aterro.

5.4 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Nessa etapa, os valores quantitativos e qualitativos dos critérios e subcritérios de cada alternativa foram comparados e, depois, ponderados em uma escala de 0 a 100%.

5.4.1 Premissas assumidas

Foram consideradas as médias anuais de geração de RSU calculadas a partir dos valores projetados na etapa de prognóstico. Nos cenários, são geradas 44.623 toneladas de material reciclável, 72.672 toneladas de material orgânico e 10.200 toneladas de outros materiais.

Nas alternativas 01 e 02, parte-se do pressuposto que 100% dos materiais recicláveis são separados e vendidos nos centros de triagem, 100% da matéria orgânica é tratada nas unidades de compostagem, sendo vendido todo fertilizante produzido, e o restante dos materiais (outros resíduos) é destinado ao aterro. Nas alternativas 03 e 04, 100% dos materiais recicláveis são separados e vendidos nos centros de triagem, 100% da matéria orgânica é tratada nos biodigestores, sendo todo fertilizante e energia gerada vendidos, e o restante dos materiais é destinado ao aterro. Já na alternativa 05, 100% dos materiais recicláveis é separado e vendido nos centros de triagem e 100% da matéria orgânica e de outros materiais é queimado no incinerador, sendo toda energia gerada vendida.

5.4.2 Critério econômico

A avaliação das alternativas no subcritério de “custos de implantação, operação e manutenção” considerou o valor (R\$/t) apontado por FADE (2014). Esse valor foi multiplicado pela quantidade anual de RSU processada em cada unidade e sendo, ao final, apresentado o valor total de cada alternativa.

O quadro 9 destaca que as alternativas centralizadas 02 e 04 levam grande vantagem sobre as outras alternativas na tomada de decisão. Os custos anuais das alternativas 01, 03 e 05 são, aproximadamente, o dobro das alternativas 02 e 03 devido, principalmente, ao maior custo dos centros de triagem (alternativas 01 e 03) e ao elevado custo do incinerador (alternativa 05).

Quadro 9: Custo anual de implantação, operação e manutenção das alternativas

CUSTO ANUAL DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	R\$ 28.672.849,50	14,13%
	Custo	R\$ 22.423.057,50	R\$ 6.249.792,00		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	R\$ 14.136.078,10	28,65%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 6.126.249,60		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	R\$ 32.387.842,14	12,51%
	Custo	R\$ 22.423.057,50	R\$ 9.964.784,64		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	R\$ 14.226.191,38	28,47%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 6.216.362,88		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	R\$ 24.931.462,18	16,25%
	Custo	R\$ 8.009.828,50	R\$ 16.921.633,68		

Fonte: Elaborado pelo autor

No caso da avaliação com o subcritério “receita gerada por produtos”, foi considerado para os materiais recicláveis (alternativas 01, 02, 03, 04 e 05) o valor médio de venda igual a R\$ 0,63/kg que foi calculado de forma ponderada a partir dos valores de venda e da composição gravimétrica coletados na pesquisa de campo. Já a receita da venda do composto (alternativas 01, 02, 03 e 04), foi calculada ao multiplicar o preço médio por tonelada - R\$ 125,00/t (CEMPRE, 2016), pela quantidade anual de resíduo orgânico tratado (72.672 toneladas) e pelo percentual médio de geração de composto - 35% (WWF-BRASIL, 2015). O cálculo da receita da venda da energia gerada utilizou a tarifa do Nordeste - R\$ 292,22/MWh (BRASIL, 2015), as fórmulas 4 e 5 para as alternativas 03 e 04, e as fórmulas 2 e 3 para a alternativa 05.

As equações (2) a (5) explicitam os cálculos e são descritas detalhadamente no Capítulo 2.

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times Mi(t) \times PCI \quad (2)$$

$$Ener. = P_{inc} \times \text{Horas ano} \times FC \quad (3)$$

$$P_{digest.} = \eta_m \times \eta_g \times PCI_{CH_4} \times R_B(t) \quad (4)$$

$$Ener. = P_{digest.} \times \text{Horas ano} \times FC \quad (5)$$

A quantidade de energia produzida nos biodigestores (alternativa 03 e 04) foi calculada a partir dos valores de $\eta_m = 0,28$ (ICLEI, 2010), $\eta_g = 98\%$ (HENRIQUES, 2004), $PCI_{CH_4} = 36$ (SILVA, 2010). Para o $R_B(t)$ foi assumido o valor médio de Moletta et al. (1986) de 74 m^3 por tonelada de material orgânico (igual a $0,19 \text{ m}^3/\text{s}$ no cenário em estudo) e o valor do FC foi assumido como 90%. Ao final, calcularam-se produção de 13.281 MWh/ano e receita de anual de R\$ 3.575.467 em cada uma das duas alternativas.

A quantidade de energia gerada pelo incinerador (alternativa 05) considerou $\eta_v = 33\%$ (USEPA, 2015), $\eta_g = 98\%$ (HENRIQUES, 2004), $Mi(t)$ igual a $2,94 \text{ kg/s}$ (material orgânico e outros), $PCI = 2,98 \text{ MJ/Kg}$ (FEAM, 2012) e $FC = 90\%$. O resultado apontou geração de 19.967 MWh/ano e receita de R\$ 5.375.408 por ano.

As alternativas 03, 04 e 05 levam pouca vantagem (entre 1 a 2%) em relação as alternativas 01 e 02, devido principalmente à venda da energia gerada nas últimas três opções. Entretanto, nesse cenário, as alternativas avaliadas possuem receitas anuais próximas o que impossibilita o destaque no grau de importância de alguma das alternativas (ver quadro 10).

Quadro 10: Receita anual gerada pelos produtos das alternativas

RECEITA ANUAL GERADA POR PRODUTOS					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	R\$ 31.194.144,38	18,87%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 3.179.400,00		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	R\$ 31.194.144,38	18,87%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 3.179.400,00		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	R\$ 34.769.611,34	21,03%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 6.754.866,96		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	R\$ 34.769.611,34	21,03%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 6.754.866,96		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	R\$ 33.390.152,32	20,20%
	Receita	R\$ 28.014.744,38	R\$ 5.375.407,94		

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.3 Critério ambiental

A avaliação das alternativas quanto ao subcritério “Emissão atmosférica de CH₄ e CO₂” considerou as taxas de emissões por quantidade de resíduo tratado apontadas por FADE (2014), Inácio *et al.* (2010), European Commission (2006) e Johnke (2002). No cálculo do grau de importância, ponderou-se a influência do CH₄ e do CO₂ para o efeito estufa (o CH₄ é 21 vezes mais nocivo do que o CO₂) utilizando-se o disposto por Nobre *et al.* (2012) – ver Quadro 11.

Os dados do Quadro 11 apontam que as alternativas 01 e 02 emitem anualmente até 509 toneladas de CH₄ a mais que as outras alternativas; entretanto, devido a não emissão de CO₂, elas possuem aproximadamente o triplo de vantagem na tomada de decisão em relação as alternativas 03, 04 e 05.

Quadro 11: Emissão de CH₄ e CO₂ nas alternativas consideradas

EMIÇÃO DE GEE NAS ALTERNATIVAS (Tonelada/ano)					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem		31,86%
	Emissão de CH ₄	0	509	509	
	Emissão de CO ₂	0	0	0	
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem		31,86%
	Emissão de CH ₄	0	509	509	
	Emissão de CO ₂	0	0	0	
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado		13,20%
	Emissão de CH ₄	0	15	15	
	Emissão de CO ₂	0	25.472	25.472	
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado		13,20%
	Emissão de CH ₄	0	15	15	
	Emissão de CO ₂	0	25.472	25.472	
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador		9,89%
	Emissão de CH ₄	0	0	0	
	Emissão de CO ₂	0	34.392	34.392	

Fonte: Elaborado pelo autor

Já a avaliação quanto ao subcritério “volume de ocupação do aterro” mostrou a redução da área de ocupação do aterro devido à redução do volume dos resíduos tratados. Como mostrado anteriormente:

$$\text{Área} = R \times L \times \text{Pop} \times 1,5 / (\rho_{\text{bulk}} \times H) \quad (1)$$

Para o cálculo da área nesta fórmula foram utilizados valores de redução dos resíduos apontadas por Chester *et al.* (2008), WWF- Brasil (2015) e Lombardi *et al.* (2015).

O Quadro 12 mostra que as quatro primeiras alternativas proporcionam redução de volume de ocupação do aterro semelhante (9.775 m²); já a alternativa 05 difere um pouco (9.934 m²), pelo motivo de tratar e reduzir também os outros materiais e não só os recicláveis e orgânicos. Nenhuma alternativa leva vantagem considerável no grau de importância, tendo todas aproximadamente 20% de relevância na tomada de decisão.

Quadro 12: Volume de ocupação do aterro nas alternativas

VOLUME DE OCUPAÇÃO DO ATERRO (m ²)					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	-9775	19,93%
	Volume de ocupação	-3719	-6056		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	-9934	20,26%
	Volume de ocupação	-3719	-6215		

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.4 Critério social

A avaliação das alternativas no critério de “Social - emprego” considerou as taxas de geração de emprego nas unidades de tratamento citadas por Brasil (2008) e ILSR (1997).

O Quadro 13 mostra que as alternativas descentralizadas 01 e 03 possuem ampla vantagem no grau de importância sobre as alternativas centralizadas 02, 04 e 05; as alternativas 01 e 03 juntas têm 76,60% de grau de importância na tomada de decisão, enquanto as alternativas 02, 04 e 05 têm somadas somente 23,40%. A alternativa descentralizada com biodigestores (03) lidera no critério social com um pouco mais de 2/5 da importância geral (43,52%). Por outro lado, a alternativa centralizada com incinerador (05) encontra-se em último lugar com peso de apenas 5,40%.

Quadro 13: Empregos gerados nas alternativas

EMPREGOS DIRETOS GERADOS					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	321	33,10%
	Empregos	220	101		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	73	7,51%
	Empregos	44	29		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	422	43,50%
	Empregos	220	202		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	102	10,48%
	Empregos	44	58		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	52	5,40%
	Empregos	44	8		

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.5 Critério técnico

A avaliação das alternativas no critério técnico de viabilidade analisou as informações técnicas e os históricos apresentados no capítulo de 2. A viabilidade de cada unidade de tratamento foi classificada como alta, média, baixa ou muito baixa, recebendo a pontuação 10, 6, 2 e 0 respectivamente.

O Quadro 14 mostra que as alternativas descentralizadas 01 e 03 obtiveram grande vantagem quanto ao grau de importância em relação as alternativas centralizadas. A alternativa menos viável é a 05; além de maior conhecimento técnico, o incinerador requer uma logística mais eficiente já que, neste caso, para abastecer a unidade com o mínimo viável (200.000 toneladas de resíduos por ano), seria necessário transportar resíduos de outros municípios. Juazeiro do Norte também possui uma experiência fracassada em formar consórcio entre municípios da região para gestão dos RSU, o que influencia negativamente o impacto da alternativa 05 no critério de viabilidade.

Quadro 14: Viabilidade das alternativas consideradas

VIABILIDADE DAS ALTERNATIVAS					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	20	34,48%
	Viabilidade	Alta	Alta		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	8	13,79%
	Viabilidade	Média	Baixa		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	16	27,59%
	Viabilidade	Alta	Média		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	8	13,79%
	Viabilidade	Média	Baixa		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	6	10,34%
	Viabilidade	Média	Muito baixa		

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.6 Critério regulatório

O Quadro 15 mostra a avaliação das alternativas quanto ao critério regulatório e em relação às prioridades da PNRS. Cada uma das unidades de tratamento foi classificada em alta, média, baixa ou muito baixa, recebendo a pontuação 10, 6, 2 e 0, respectivamente.

Todas as alternativas obtiveram grau de importância iguais (20%). Nos cenários apontados com as premissas descritas anteriormente, as unidades que compõem as alternativas estão totalmente de acordo com a prioridade definida na PNRS.

Quadro 15: Adequação regulatória das alternativas

APLICAÇÃO DAS PRIORIDADES DA PNRS					
				TOTAL	GRAU DE IMPORTÂNCIA NA TOMADA DE DECISÃO
ALTERNATIVA 01 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Unidade descentralizada de compostagem	20	20,00%
	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta		
ALTERNATIVA 02 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Unidade centralizada de compostagem	20	20,00%
	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta		
ALTERNATIVA 03 (descentralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem manual	Biodigestor descentralizado	20	20,00%
	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta		
ALTERNATIVA 04 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Biodigestor centralizado	20	20,00%
	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta		
ALTERNATIVA 05 (centralizada)	Unidades de tratamento	Centro de triagem automatizado	Incinerador	20	20,00%
	Aplicação das prioridades da PNRS	Alta	Alta		

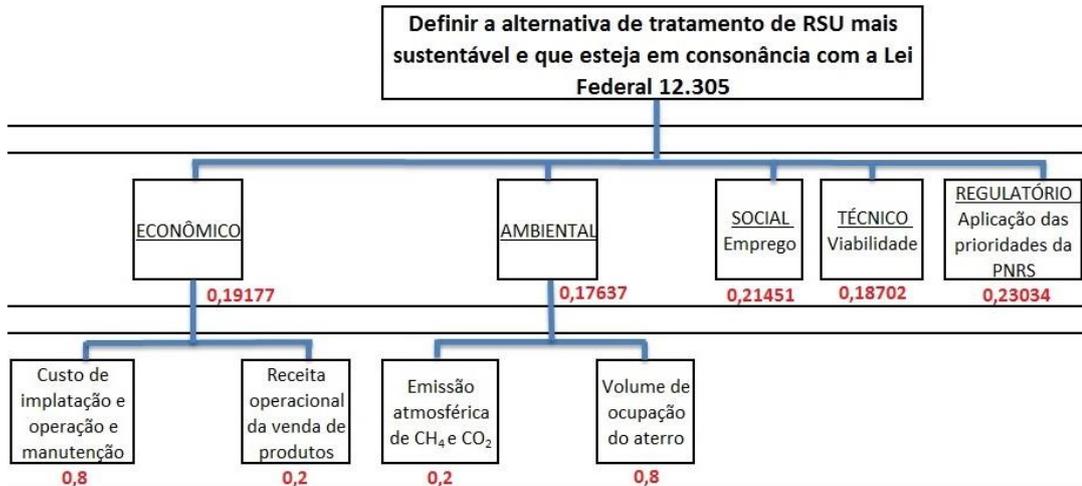
Fonte: Elaborado pelo autor

5.5 AVALIAÇÃO DO PESO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS

Os critérios e subcritérios foram avaliados por oito especialistas da área. Após a aplicação do questionário 02 através da técnica Delphi, utilizou-se estatística básica (mediana) para calcular os valores a serem inseridos no *Software SuperDecisions*®.

A Figura 22 apresenta o resultado final desta etapa. Os cinco critérios obtiveram peso entre 17% e 23%, sendo o critério regulatório o mais importante e o critério ambiental o menos importante na definição da alternativa de tratamento de RSU para Juazeiro do Norte. Em relação aos subcritérios, o custo (80%) e o volume de ocupação do aterro (80%) foram avaliados como dominantes na composição dos seus critérios, econômico e ambiental respectivamente, tornando pouco representativo a influência da receita e da emissão de CH₄ e CO₂ na tomada de decisão.

Figura 22: Peso dos critérios e subcritérios



Fonte: Elaborada pelo autor

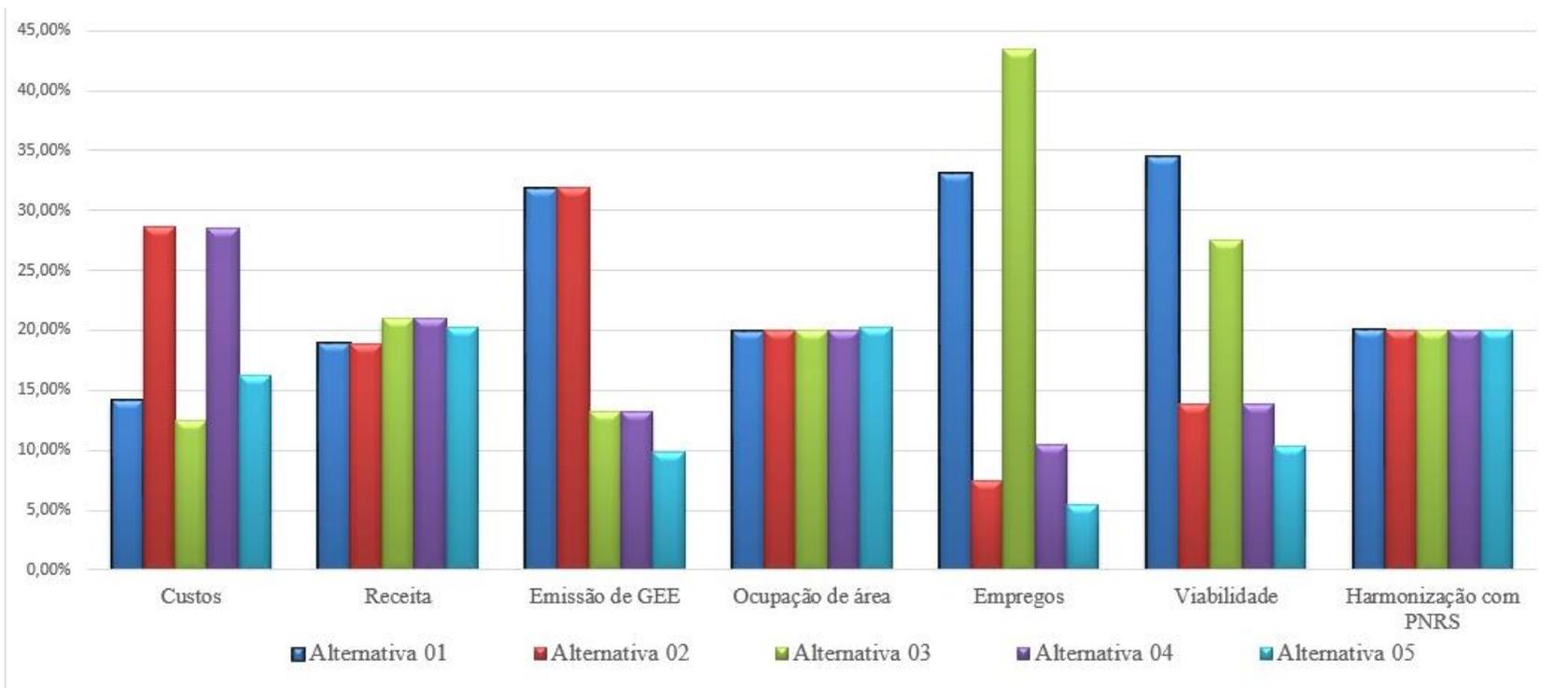
5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa, são apresentados e analisados os resultados obtidos pelo método AHP. Primeiramente, analisaram-se os resultados de cada uma das alternativas nos diferentes critérios e, em seguida, o *ranking* geral das alternativas produzido pelo *Software SuperDecisions*[®]. Por fim, é realizada a análise de sensibilidade dos resultados em cada um dos critérios/subcritérios.

5.6.1 Resultados e discussão

O Gráfico 8 mostra o comportamento dos resultados de prioridade das alternativas nos 7 diferentes critérios/subcritérios de avaliação.

Gráfico 8: Ranking das alternativas por critério



CUSTOS		RECEITA		EMIÇÃO DE GEE		OCUPAÇÃO DE ÁREA DO ATERRO		EMPREGOS		VIABILIDADE		HARMONIZAÇÃO COM PNRS	
Alternativa 02	28,65%	Alternativa 03	21,03%	Alternativa 01	31,86%	Alternativa 05	20,26%	Alternativa 03	43,52%	Alternativa 01	34,48%	Alternativa 01	20,00%
Alternativa 04	28,47%	Alternativa 04	21,03%	Alternativa 02	31,86%	Alternativa 01	19,93%	Alternativa 01	33,06%	Alternativa 03	27,59%	Alternativa 02	20,00%
Alternativa 05	16,25%	Alternativa 05	20,20%	Alternativa 03	13,20%	Alternativa 02	19,93%	Alternativa 04	10,50%	Alternativa 02	13,79%	Alternativa 03	20,00%
Alternativa 01	14,13%	Alternativa 01	18,87%	Alternativa 04	13,20%	Alternativa 03	19,93%	Alternativa 02	7,51%	Alternativa 04	13,79%	Alternativa 04	20,00%
Alternativa 03	12,51%	Alternativa 02	18,87%	Alternativa 05	9,89%	Alternativa 04	19,93%	Alternativa 05	5,41%	Alternativa 05	10,34%	Alternativa 05	20,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

A alternativa 01 lidera o ranking nos critérios/subcritérios “Emissão de GEE”, “Viabilidade” e “Harmonização com a PNRS” e destaca-se na geração de empregos (2º lugar). Entretanto, não obtêm bons resultados econômicos (custos e receita).

A alternativa 02 lidera na “Emissão de GEE”, “Harmonização com a PNRS” e “Custos”; por outro lado, possui a segunda pior colocação em “Empregos” e “Viabilidade”.

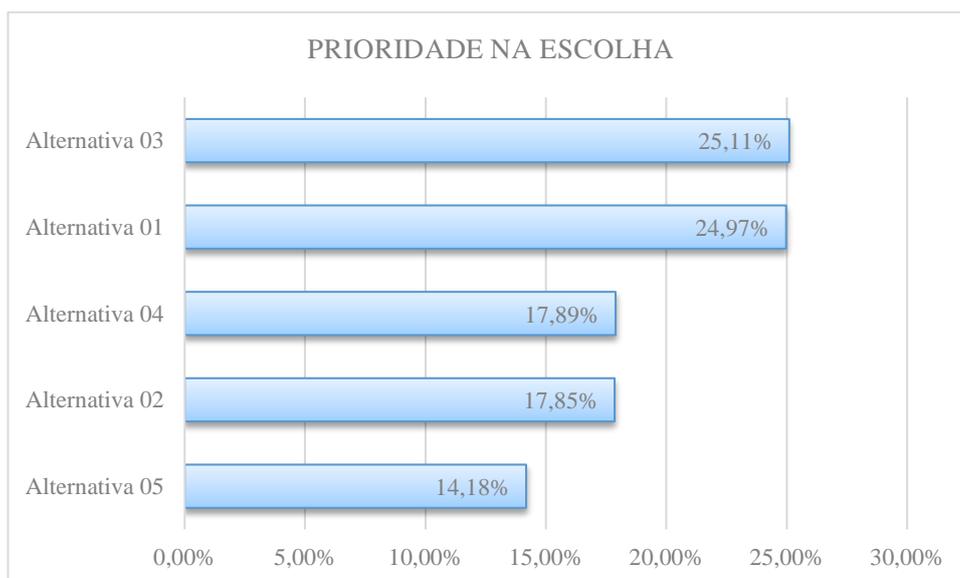
A alternativa 03 obtêm ótimos resultados em “Harmonização com a PNRS” (1º lugar), “Empregos” (1º lugar), “Receita” (1º lugar) e “Viabilidade” (2º lugar), e resultado ruim em “Emissão de GEE” (2º pior).

A alternativa 04 destaca-se na 1ª posição em “Receita” e “Viabilidade”, e na 2ª posição em “Custos” (diferença de somente 0,18% da 1ª colocada); no entanto, apresenta deficiência em “Emissão de GEE” (2º pior) e “Empregos” (3º pior).

Por fim, a alternativa 05 obtêm vantagem em “Ocupação de área do aterro” (0,33% a mais do que as outras alternativas) e “Receita” (somente 0,83% a menos do que a 1º colocada). Apesar disto, seus resultados são ruins em “Viabilidade” (último lugar), “Empregos” (último lugar), “Emissão de GEE” (último lugar) e “Custos” (3º pior).

Através dos valores apontados no gráfico 8 e dos pesos definidos pelos especialistas e mostrados na Figura 19, obteve-se o *ranking* geral das alternativas no método AHP (ver Gráfico 9).

Gráfico 9: Ranking geral das alternativas



Fonte: Elaborado pelo autor

As alternativas 03 (centro de triagem e digestor anaeróbico descentralizados) e 01 (centro de triagem e unidade de compostagem descentralizados) são apontadas como as opções de tratamento de RSU mais favoráveis para Juazeiro do Norte, com percentual de 25,11% e 24,97%, respectivamente. As alternativas descentralizadas 01 e 03 levam vantagem sobre as alternativas centralizadas 04, 02 e 05 devido, principalmente, à maior geração de empregos e à viabilidade técnica que se mostra bem maior em experiências no País e na Índia.

As alternativas 04 e 02 aparecem, respectivamente, na 3ª e 4ª colocações. Apesar de apresentarem os menores custos, a baixa geração de emprego afeta negativamente seus resultados de forma decisiva, já que o critério social é avaliado como o segundo mais relevante na tomada de decisão.

A alternativa 05 (centro de triagem automatizado e incinerador) é a opção de tratamento menos favorável para a região, obtendo resultado (14,18%), quase 2 vezes menor do que o resultado do primeiro colocado. Dentre os sete critérios/subcritérios avaliados, essa alternativa ficou na última posição em três, inclusive no critério com maior peso (“Social”).

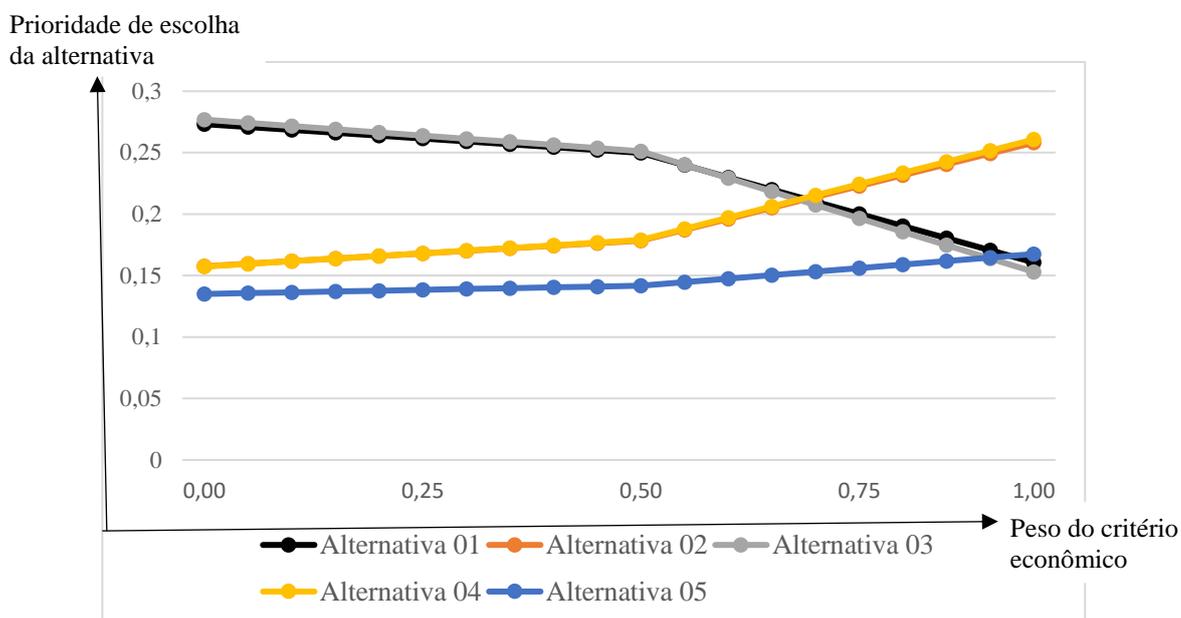
5.6.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi utilizada para entender como o resultado geral se comportaria com diferentes avaliações nos pesos dos critérios. O grau de importância de cada critério foi alterado individualmente de 0 a 100% mantendo o peso dos demais critérios proporcionalmente constantes.

O Gráfico 10 analisa a sensibilidade do *critério econômico*. As alternativas descentralizadas (01 e 03) respondem negativamente ao crescimento do peso econômico, diferentemente das alternativas centralizadas (02, 04 e 05) que aumentam seus resultados com a evolução do peso desse critério. A partir do peso 0,5, a influência do critério no resultado se acentua e no peso 0,7 as alternativas 02 e 04 superam as 01 e 03 e passam a apresentar os melhores resultados entre as opções.

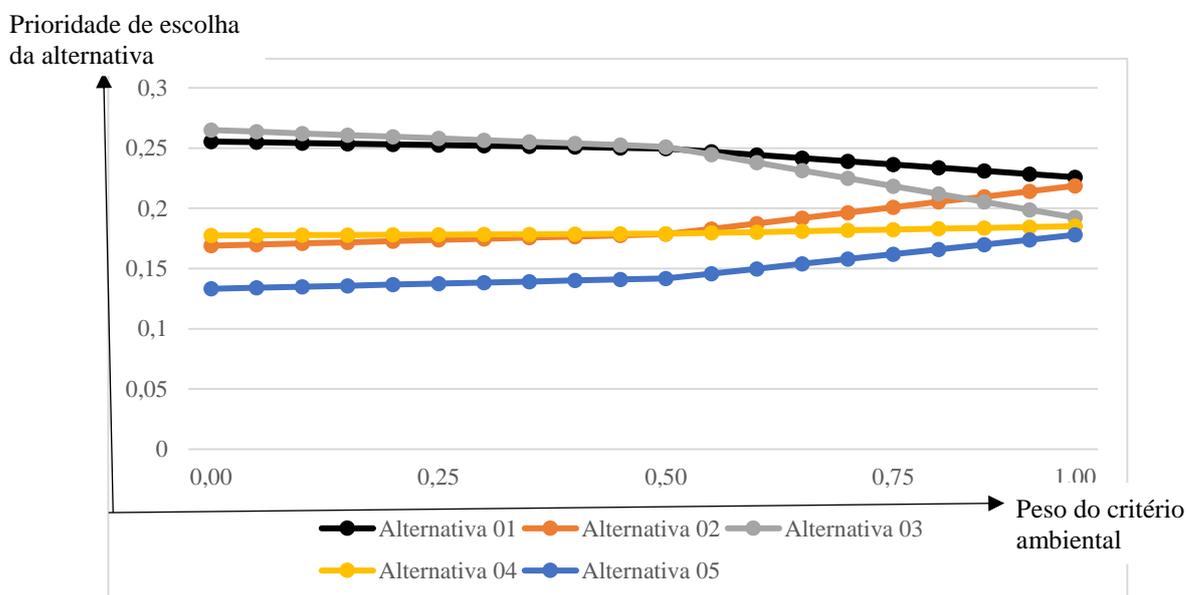
O Gráfico 11 analisa a sensibilidade do *critério ambiental*. A medida que a prioridade ambiental aumenta, os resultados das alternativas 01 e 03 diminuem, enquanto os das alternativas 02 e 05 crescem consideravelmente principalmente a partir do peso 0,5. Por volta do peso 0,85, a alternativa 02 ultrapassa a alternativa 03 e torna-se a segunda melhor opção.

Gráfico 10: Análise de sensibilidade do critério econômico



Fonte: Elaborado pelo autor

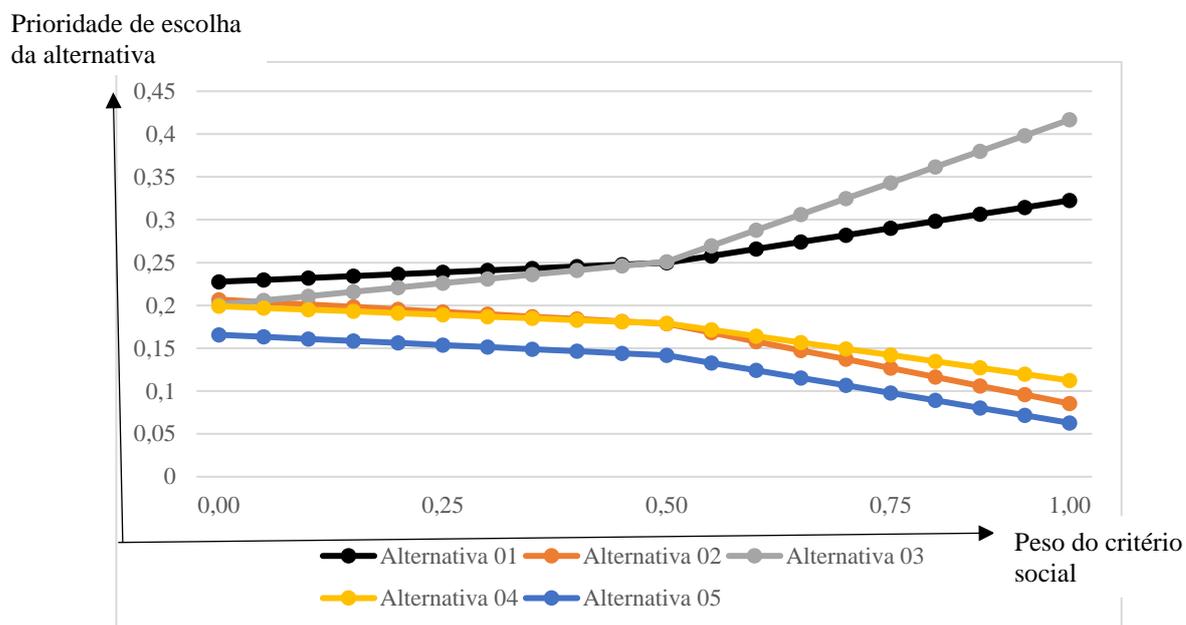
Gráfico 11: Análise de sensibilidade do critério ambiental



Fonte: Elaborado pelo autor

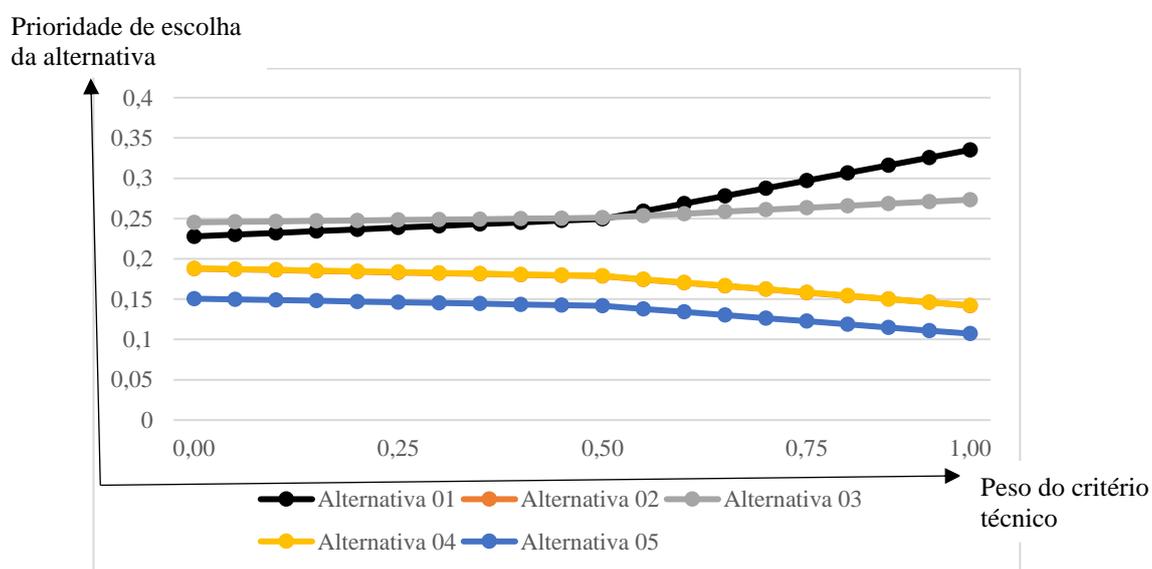
O Gráfico 12 analisa a sensibilidade do *critério social*. As alternativas 01 e 03 obtêm os melhores resultados em quase todos os pesos (0,1 até 1). A medida que a prioridade social aumenta, os resultados das alternativas 01 e 03 evoluem, enquanto os das alternativas centralizadas 02, 04 e 05 decrescem, aumentando o domínio das opções descentralizadas.

Gráfico 12: Análise de sensibilidade do critério social



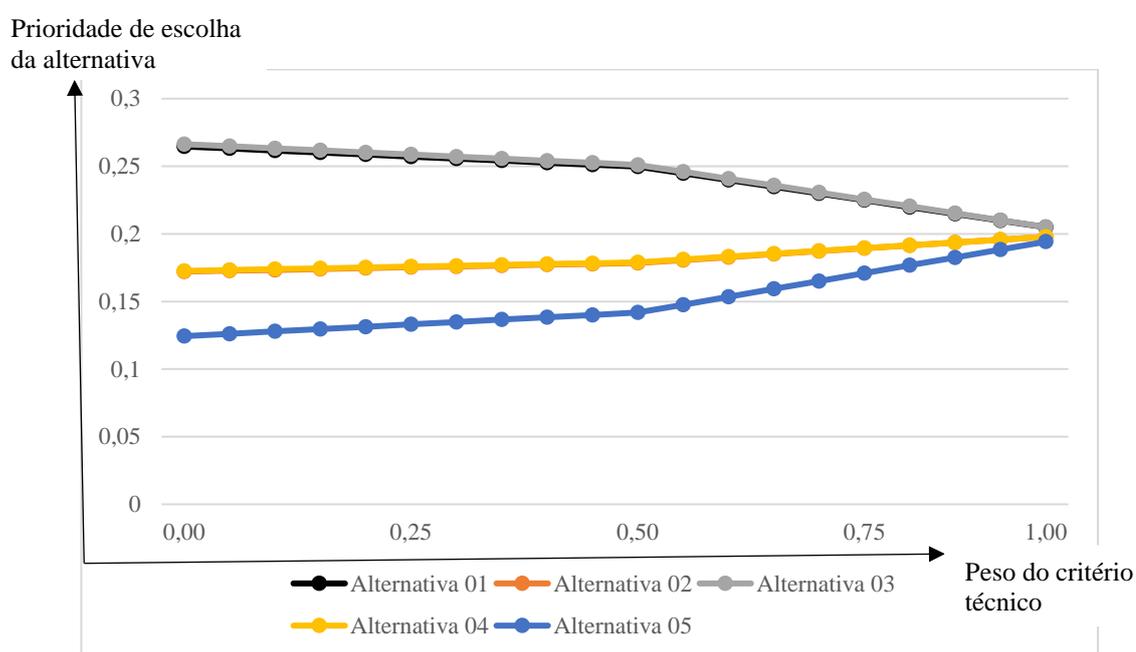
O Gráfico 13 analisa a sensibilidade do *critério técnico*. As alternativas descentralizadas 01 e 03 obtêm os melhores resultados em toda a análise. A medida que a prioridade técnica aumenta, os resultados das alternativas 01 e 03 melhoram, enquanto os das alternativas centralizadas 02, 04 e 05 pioram. A partir do peso 0,5, a alternativa 01 alcança resultados ainda melhores e começa a se distanciar da segunda colocada (alternativa 03).

Gráfico 13: Análise de sensibilidade do critério técnico



O Gráfico 14 analisa a sensibilidade do *critério regulatório*. As alternativas 01 e 03 obtêm os melhores resultados em toda a análise. A medida que a prioridade regulatória aumenta, os resultados das alternativas 02, 04 e 05 evoluem, enquanto os das alternativas centralizadas 01 e 03 pioram. Os resultados das cinco alternativas tendem a se igualarem no peso 1 (100%).

Gráfico 14: Análise de sensibilidade do critério regulatório



Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo é responsável pelas conclusões e recomendações da pesquisa. Nele são apresentadas as principais conclusões do estudo, suas limitações, sugestões para trabalhos futuros e considerações finais.

6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O presente trabalho diagnosticou e propôs soluções para a gestão do sistema de RSU do município de Juazeiro do Norte, alcançando assim o objetivo geral definido no capítulo 01. Além de atingir os objetivos específicos do ponto de vista teórico nos capítulos 02 e 03, cumpriu-se, no capítulo 05, os objetivos específicos práticos de aplicar a abordagem metodológica proposta ao atual sistema de gestão dos resíduos sólidos urbanos no Município de Juazeiro do Norte, de conceber, avaliar e comparar cenários futuros de possíveis impactos vinculados às proposições elencadas para a problemática em estudo e de contribuir com proposições para que o sistema de gestão dos resíduos sólidos urbanos do Município de Juazeiro do Norte se adeque ao que reza a Lei Federal 12.305/10.

A metodologia aplicada no estudo foi criada a partir do referencial teórico presente nos capítulos 02 e 03 e baseou-se principalmente na metodologia sistêmica de solução de problemas SSM, na PNRS, em diversas técnicas quantitativas de projeção, no método de apoio à decisão AHP, em critérios de sustentabilidade de Chang e Pires (2015) e em inúmeras informações e dados secundários das boas práticas de tratamento de RSU no Brasil e no Mundo.

Apesar das limitações de recursos, a pesquisa de campo foi satisfatória, uma vez que foram coletados uma grande quantidade de dados e informações úteis e suficientes para responder todos os pontos abordados no questionário 01, possibilitando a conclusão das 2 primeiras etapas da metodologia (Contextualização e caracterização do objeto de estudo; Diagnóstico e prognóstico do sistema de RSU).

A abordagem sistêmica proporcionou uma visão ampla da problemática do sistema na região. Para a caracterização da situação, o sistema de gestão de RSU foi dividido nas etapas (subsistemas) de geração, coleta e transporte, tratamento e RUL, sendo ao final criado um fluxo geral com informações dos subsistemas, facilitando assim o entendimento do sistema como um todo e a realização do diagnóstico.

Conclui-se que a atual gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte possui problemas sistêmicos com impactos negativos em vários âmbitos que devem ser melhorados. Esta pesquisa diagnosticou o sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos da região e projetou alguns resultados caso nenhuma mudança ocorra. O diagnóstico destaca problemas como: a triagem na origem praticamente não existe, a coleta não é seletiva, o percentual de coleta está até 7% abaixo do valor de cidades do Sudeste, a integração entre participantes da cadeia (prefeitura, catadores e indústria de reciclagem) é deficiente e existe quebra da hierarquia regulatória devido à falta de unidades de tratamento. Esses problemas causam grandes impactos ambientais negativos e uma perda significativa de resíduos com valor econômico e potencial de geração de empregos. Os resultados do prognóstico apontam aumento de 70% na geração anual de RSU nos próximos 20 anos e, caso nada seja feito, os resíduos coletados e enterrados no aterro nesse período ocuparão uma área equivalente a 22 campos de futebol (153.212 m²) e emitirão aproximadamente 159.341 toneladas de gás metano e 437.195 toneladas de gás carbônico que se estenderão nos próximos 40 anos emitindo anualmente 7.967 toneladas de gás metano e 21.860 toneladas de gás carbônico.

As boas práticas de gestão de resíduos sólidos presentes atualmente no Brasil e, principalmente, no Mundo, ressaltam a importância das unidades de tratamento de resíduos na obtenção de bons resultados. O planejamento e implantação de um conjunto de unidades de tratamento de resíduos em Juazeiro do Norte otimizariam os atuais resultados, mitigando vários problemas destacados no diagnóstico como a quebra da hierarquia regulatória devido à falta de unidades de tratamento, a perda significativa de resíduos com valor econômico e potencial de geração de empregos e a falta de iniciativas para reduzir impactos ambientais negativos.

Outra conclusão importante é que o sucesso de uma alternativa de tratamento de resíduos depende bastante das características econômica, ambiental, social, técnica e regulatória as quais variam por tipo de tratamento (mecânico, biológico ou térmico) e por modelo (centralizado ou descentralizado). O sistema de gestão de RS de uma região deve ser planejado para que, tanto quanto possível, seja tecnicamente viável e capaz de promover a sustentabilidade econômica das operações, preservar o meio ambiente, preservar a qualidade de vida da população, contribuir para a solução dos aspectos sociais envolvidos com a questão e atender a legislação vigente.

Este estudo aplicou o método de apoio a decisão (AHP) para comparar cinco diferentes alternativas de tratamento de RSU, modelos centralizado e descentralizado mesclando três tipos de tratamentos (mecânico, biológico e térmico), sendo avaliado os critérios social (emprego), técnico (viabilidade) e regulatório (aplicação das prioridades da PNRS) bem como os

subcritérios econômicos de custo e receita, e os subcritérios ambientais de emissão de GEE e volume de ocupação do aterro.

Baseado nos resultados obtidos, as alternativas descentralizadas 01 e 03 apresentam-se como as opções mais favoráveis para a região de Juazeiro do Norte; nessa situação, os benefícios de maior geração de emprego e viabilidade técnica superior levam vantagem sobre o impacto negativo de maiores custos. Os resultados também destacam a grande diferença entre os impactos causados por alternativas com tratamento biológico e com tratamento térmico. As especificidades da região não favorecem o tratamento térmico, exemplos disso são a dificuldade de formar consórcio entre municípios da região, com o intuito de obter resíduos suficientes para a queima, e o grande percentual de resíduos orgânicos gerados, que diminui o poder calorífico dos suprimentos das usinas térmicas e causa impacto negativo na geração de energia e na viabilidade econômica da unidade.

Os resultados das alternativas mais favoráveis (01 e 03), ressaltam diversos benefícios futuros caso unidades de tratamento de resíduos sejam implantadas no município. Estima-se que as alternativas 01 e 03 tenham um potencial de gerar, respectivamente, receita anual de R\$ 31.194.144 e R\$ 34.769.611. Já em relação ao âmbito social, a alternativa 01 cria 321 empregos diretos e a alternativa 03 gera 422 novos postos de trabalho que, na sua maioria, podem beneficiar os catadores de matérias recicláveis, atingindo assim um dos objetivos da PNRS. As alternativas 01 e 03 também apresentam bons resultados na esfera ambiental, diminuindo anualmente 9.775 m² (6,38%) do volume de ocupação do aterro em relação ao prognóstico (caso nenhuma mudança ocorra), de 153.212 m² para 143.437 m². Outro benefício ambiental evidente é a redução da emissão de GEE, principalmente na alternativa 01 que evita a emissão anual de 21.860 toneladas de gás carbônico e 7.458 toneladas de gás metano ao comparar com o prognóstico apresentado.

Por fim, a análise de sensibilidade de cada um dos critérios foi utilizada para entender como o resultado geral do método AHP se comportaria com diferentes avaliações nos pesos dos critérios. O peso dos critérios e subcritérios foram definidos por oito especialistas da área constando-se valores diversos, logo outros resultados podem ser obtidos dependendo de quem são os tomadores de decisão e quais critérios vão ser priorizados. Na maioria das análises realizadas, os resultados obtidos foram semelhantes (alternativas 01 e 03 nas primeiras colocações e alternativas 02, 04 e 05 nas últimas posições), entretanto constatou-se que, em uma avaliação na qual o critério econômico tenha peso superior ou igual a 70%, o resultado geral mudaria de forma significativa e as alternativas descentralizadas 02 e 04 seriam apontadas como as melhores opções de tratamento de RSU.

6.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O tempo disponível para a pesquisa de campo foi de apenas 3 dias, restringindo a quantidade de pessoas e partes interessadas que respondeu o questionário 01. O questionário 01 foi respondido por somente cinco pessoas, deixando de ouvir as percepções de partes interessadas importantes como os representantes da indústria de reciclagem e os deposeiros.

O estudo limitou-se a utilizar a taxa de geração de RSU *per capita* do Estado do Ceará, afetando a precisão da projeção dos cenários. Não foi encontrado estudos que apontem parâmetros precisos de produção de RSU em Juazeiro do Norte. Além disso, a falta de tempo, pessoal e recursos monetários impossibilitaram a aplicação de uma pesquisa primária com uma amostra significativa para definir valores e características mais realistas da geração de RSU da região.

O subcritério *emissão atmosférica de GEE* não considerou todos os gases de efeito estufa. Devido à dificuldade de acesso a dados secundários de emissão dos diferentes tratamentos de RSU, somente os gases metano e carbônico foram quantificados na avaliação de cenários. Já o critério *econômico* limitou-se a impactos diretos deixando de considerar impactos econômicos indiretos em relação a saúde e aos ecossistemas.

A proposição de melhorias focou principalmente na solução do problema de quebra da *hierarquia regulatória* devido à falta de unidades de tratamento, desconsiderando outras iniciativas de mudanças necessárias no atual sistema de gestão de resíduos de Juazeiro do Norte.

Várias possibilidades de alternativas de tratamento de resíduos não foram consideradas no estudo. Restringiu-se a avaliar 5 alternativas já que o aumento da quantidade de alternativas avaliadas eleva a complexidade da aplicação do método AHP. A incineração foi a única tecnologia térmica a ser analisada, sendo a dificuldade de obter informações sobre as características das demais tecnologias térmicas (pirólise, gaseificação e arco de plasma) o principal motivo dessa limitação.

Por fim, na etapa de *Avaliação do peso dos critérios e subcritérios*, foram entrevistados apenas oito especialistas da área e, além disso, cada especialista avaliou o peso dos critérios somente uma vez. As restrições de tempo da pesquisa e agenda dos entrevistados impossibilitaram que os resultados da primeira avaliação fossem apresentados aos especialistas para que fossem analisados e reavaliados até um consenso geral, logo o Método Delphi não foi concluído por completo.

6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em busca da otimização do processo de decisão, trabalhos futuros podem considerar outros métodos de apoio à decisão que não o AHP. Sendo este usado, pode-se excluir e/ou incluir critérios/subcritérios e comparar os resultados obtidos. Alguns exemplos de subcritérios não avaliados que podem ser incluídos são a receita gerada pela venda dos créditos de carbono, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), a emissão atmosférica de dióxido de nitrogênio (NO₂), a emissão de GEE evitada pela redução da demanda de energia produzida por combustíveis fósseis e os custos indiretos à saúde.

A projeção da receita gerada pela venda dos produtos das unidades de tratamento considerou que 100% dos produtos fossem vendidos; entretanto, é necessário que trabalhos futuros avaliem o tamanho do mercado consumidor, sua localização e outras especificidades existentes na região para os materiais recicláveis, produtos da compostagem e energia elétrica produzida.

Sugere-se também que sejam realizadas análises aprofundadas dos problemas das etapas de geração, coleta, transporte e RUL para melhor entendimento e proposição de melhorias. Julga-se essencial a realização de trabalhos com foco na cadeia produtiva da reciclagem avaliando as interações entre as partes interessadas da região (geradores, prefeitura, catadores, deposeiros e indústria de reciclagem) e propondo um modelo de gestão que melhor se adeque às especificidades regionais, trazendo resultados compatíveis com as potencialidades do sistema. Deve-se também avaliar e propor soluções para educação ambiental relacionada à gestão dos resíduos sólidos do município como a possibilidade de os catadores serem também agentes de educação ambiental; a educação ambiental tem um papel essencial na gestão de RS, logo é necessário levantar as iniciativas realizadas nesse contexto, apontar os atuais problemas e propor ações de educação que visem melhorar os resultados do sistema.

O aterro controlado de Palmeirinha será fechado futuramente, portanto é prescindível que o fechamento seja planejado para mitigar o passivo ambiental e social causado pelos resíduos enterrados no local.

Outra sugestão é realizar um estudo com o intuito de definir e aplicar uma metodologia que determine o porte, a quantidade e a localização ideal de cada uma das unidades de tratamento dos resíduos.

A metodologia desenvolvida e aplicada nesse estudo pode ser empregada com o intuito de analisar outras regiões do Brasil e do Mundo. Sugere-se que trabalhos futuros adotem essa metodologia para realizar o diagnóstico e prognóstico de diferentes sistemas de gestão de RSU

e, para definir e dar suporte a propostas de implantação de alternativas de tratamento de resíduos; ao final, os resultados encontrados podem ser comparados com aqueles constatados nessa pesquisa.

Finalmente, acredita-se essencial que sejam realizados trabalhos na região que abordem outros tipos de resíduos que não os resíduos sólidos urbanos. Estudos futuros devem analisar também os sistemas de gestão de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, de construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração, caso existam.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destaca-se o esforço da AMAJU em otimizar e mitigar os problemas do sistema de gestão de RSU do município de Juazeiro do Norte. Nos últimos anos, iniciativas realizadas melhoraram as condições de vida de catadores e proporcionaram considerável evolução na maneira que os RSU são dispostos. O Superintendente da Autarquia Municipal do Meio Ambiente de Juazeiro do Norte, Eraldo Oliveira, e o Diretor de Monitoramento Ambiental, André Wirtzbiki, apresentam conhecimento atualizado sobre o assunto e buscam, constantemente, interação com instituições de ensino (Exemplo: UFC, URCA e IFCE).

Considerando-se as iniciativas realizadas no município, este estudo se apresenta como uma contribuição acadêmica para Juazeiro do Norte que pode ser utilizada pelos tomadores de decisões como base metodológica para planejar e definir ações de melhoria no sistema de gestão de resíduos sólidos.

Por fim, caso decida-se pela implantação de uma alternativa de tratamento de RSU na região, julga-se necessário um esforço conjunto entre várias partes interessadas do sistema de gestão da região. A população, a prefeitura, o governo do estado, os catadores, as indústrias de reciclagem, ONG's e instituições de ensino deverão trabalhar juntos e alinhados no mesmo propósito.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, S. A.; RAMASAMY, E. V. **Biotechnological methods of pollution control**. Orient Longman. Universities Press India Ltd., Hyderabad, India, 1999.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011**. 2012. Disponível em: <<http://a3p.jbrj.gov.br/pdf/ABRELPE%20Panorama%202001%20RSU-1.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2015.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. 2013. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2015.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. 2014. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2015.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2015.
- ALI, M. **Sustainable composting: case studies and guidelines for developing countries**. Water, Engineering and Development Centre, Lou-Ghborough University, UK, p. 5-11, 2004.
- ALMANSA, C.; MARTINEZ-PAZ, J. M. What weight should be assigned to future environmental impacts? a probabilistic cost benefit analysis using recent advances on discounting. **Science of the Total Environment**. v. 409, p. 1305–1314, 2011.
- AMORIM, L. S. Economia solidária e catadores de materiais recicláveis em Salvador e Curitiba: políticas públicas e a enunciação de identidades no Brasil. **Revista Avaliação de Políticas Públicas**, Fortaleza, ano 5, v. 2, n. 10, p. 21-34, jul./dez., 2012. Disponível em: <http://www.mapp.ufc.br/images/revista_aval/edi%C3%A7%C3%B5es/AVAL-10.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2015.
- ARSOVA, L. **Anaerobic digestion of food waste: current status, problems and an alternative product**. New York City: Columbia University, 2010.
- ATHEY, T. H. **Systematic systems approach: an integrated method for solving systems problems**. New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

AYE, L.; WIDJAYA, E. R. Environmental and economic analyses of waste disposal options for traditional markets in Indonesia. **Waste Management**. v. 26, p. 1180–1191, 2006.

BANCO MUNDIAL. **What a waste: a global review of solid waste management**. 2012. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf>. Acesso em: 04 set. 2015.

BASTOS, M. M. M. **Elementos de um plano de pesquisa e de uma monografia científica: método, metodologia e cronograma**. Fortaleza, 2008.

BERTALANFFY, L. V. **General system theory: foundations, development and applications**. New York: George Braziler, 1968.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Elementos para a organização da coleta seletiva e projeto dos galpões de triagem**. 2008. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/ManualColetaSeletiva.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015. **Anuário estatístico de energia elétrica 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro, 2015: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Guia para elaboração dos planos de gestão de resíduos sólidos**. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano –SRHU/MMA. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_arquivos/guia_elaborao_plano_de_gesto_de_resduos_rev_29nov11_125.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2015.

BRASIL. **Política nacional de resíduos sólidos**. Lei federal número 12.305 de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 04 set. 2015.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy: key element for sustainable waste management. **Waste Management**. v. 37, p. 3-12, 2015.

CAOPMA. Centro de Apoio Operacional às Promotorias de Proteção ao Meio Ambiente. **Unidades de triagem e compostagem de resíduos sólidos urbanos: apostila para a gestão municipal de resíduos sólidos urbanos**. 2. ed. Curitiba, Paraná. 2013. Disponível em: <

http://www.meioambiente.mppr.mp.br/arquivos/File/Apostila_compostagem_Final_Pos_Print.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2016.

CEARÁ (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Política estadual de resíduos sólidos**. Lei número 16.032. Ceará, 2016.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Artigos e publicações**: ficha técnica composto urbano. 2016. Disponível em: < <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/10/composto-urbano> >. Acesso em: 15 mai. 2016

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Cempre review**. 2013. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/download/CEMPRE_review_2013.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2016

CHANG, N. B.; PIRES, A. **Sustainable solid waste management**: a systems engineering approach. New Jersey: IEEE Wiley, 2015.

CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice**. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 1981.

CHECKLAND, P., POULTER, J. **Learning for action**: a short definitive account of soft systems methodology and its use for practioners, Teachers and Students. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2006.

CHEN, D.; YIN, L.; WANG, H.; HE, P. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. **Waste Management**. v.34, 2014.

CHESTER, M.; MARTIN, E.; SATHAYE, N. Energy, greenhouse gas, and cost reductions for municipal recycling systems. **Environmental Science & Technology**. v. 42, p. 2142–2149, 2008.

CHO, H. S.; MOON, H. S.; KIM, J. Y. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. **Bioresource Technology**. v. 109, p. 86–92, 2012.

CHRISTENSEN, T. H. **Solid waste technology and management**. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 2011.

CICERI, H. N. (2014). **Tecnologías emergentes para el tratamiento de residuos urbanos**: el caso plasma térmico. Área de administración industrial e innovacion tecnológica. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Disponível em: <<http://informatica.fquim.unam.mx/ciceri/files/TECNOLOGIAS%20EMERGENTES%20PA>

RA%20EL%20TRATAMIENTO%20DE%20LOS%20RESIDUOS%20URBANOS.pdf>.

Acesso em: 20 ago. 2015.

COMLURB. Companhia Municipal de Limpeza Urbana. **Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município do Rio de Janeiro**. 2005. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/comlurb>> Acesso em: 11 Mai. 2016.

D'ALOIA, L. G. P. **Avaliação multicritério de cenários em gerenciamento de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

DEWEES, D.; HARE, M. Economic analysis of packaging waste reduction. **Canadian Public Policy - Analyse de Politiques**. v. 24, n. 4, p. 453–470, 1998.

DIAS, F. P. **Incineração de resíduos sólidos: análise custo benefício do incinerador de resíduos sólidos do P-Sul - DF**. Brasília – Distrito Federal: Universidade de Brasília, 2006.

EC. European Commission. **Integrated pollution prevention and control: reference document on best available techniques for the waste treatment industries**. 2006.

EC. European Commission. **Guide to cost benefit analysis of investment projects: structural funds, cohesion fund and instrument for pre-accession**. 2008. Disponível em: <http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/guides/cost/guide2008_en.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

FADE. Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Grupo de resíduos sólidos. UFPE/BNDES. Jul., 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente. 294 p. 2012.

FEAM. Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas**

Gerais: relatório 1 - estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. 2ª edição. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/fean/relatorio%201%20%20estado%20da%20arte%20do%20tratamento%20termico.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

FEHR, M. O alvo final é o lixo zero. **Caminhos da Geografia**. v. 11, n. 35, p. 54-62, 2010.

GATTAI, S. **As competências dos empreendedores solidários:** estudo com catadores em cooperativas de coleta e tratamento de resíduos sólidos em São Bernardo do Campo. Tese (Pós-graduação em Administração) – Departamento de Administração - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GHOSH, S. K., 2014. **Paradigm shift for a total waste management in developing in India**. In: Proceedings of the fourth international conference on solid waste management, p. 3–12.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure. **Water Research**. v. 39, p. 1543–1552, 2005.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos:** uma abordagem tecnológica. 2004. 203 f.. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

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

HOKKANEN, J.; SALMINEN, P. Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. **European Journal of Operational Research**. v. 98, p. 19–36, 1997.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas populacionais para os municípios e para as unidades da federação brasileiras em 01.07.2015**. 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.xls>. Acesso em: 05 out. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações estatísticas**. 2010. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=230730>>

&idtema=67&search=ceara|juazeiro-do-norte|censo-demografico-2010:-resultados-do-universo-caracteristicas-da-populacao-e-dos-domicilios->. Acesso em: 23 abr. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PIB municipal 2007-2011**. 2012. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Pib_Municipios/2011/xls/Pib_Municipal_2007_2011_xls.zip>. Acesso em: 03 out. 2015.

ICLEI. **Manual para aproveitamento de biogás volume 2: efluentes urbanos**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

ILSR. Institute for Local Self-Reliance. **Waste to wealth: recycling means business**. Washington, DC, 1997. Disponível em: <<https://ilsr.org/recycling-means-business/>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

INACIO C. T; BETTIO D. B. B.; MILLER P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissões de metano**. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

INSTITUTO ETHOS. **Política nacional de resíduos sólidos: desafios e oportunidades para as empresas**. São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www3.ethos.org.br/wp-content/uploads/2012/08/Publica%C3%A7%C3%A3o-Residuos-Solidos_Desafios-e-Oportunidades_Web_30Ago12.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2015.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Brasília, DF: IPEA, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2016.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em números 2011**. 2012. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2011/completa/Ceara_em_Numeros_2011.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2015.

JOHNKE, B. **Emissions from waste incineration: good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. p. 455-468, 2002.

KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: a short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 31, p. 113–120, 2014.

KARANJEKAR, R. V.; BHATT, A.; ALTOUQUI, S.; NEDA A, JANGIKHATOONABAD, V. D.; SATTTLER, M. L.; HOSSAIN, M. D. S.; CHEN, V. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: the CLEEN model. **Waste Management**. v. 46, p. 389–398, 2015.

KARMPERIS, A. C.; ARAVOSSIS, K.; TATSIPOULOS, I. P.; SOTIRCHOS, A. Decision support models for solid waste management: review and game-theoretic approaches. **Waste Management**. v. 33, p. 1290–1301, 2013.

KARMPERIS, A. C.; SOTIRCHOS, A.; ARAVOSSIS, K.; TATSIPOULOS, I. P. Waste management project's alternatives: a risk-based multi-criteria assessment (RBMCA) approach. **Waste Management**. v. 32, p. 194–212, 2012.

KING, M. F.; GUTBERLET, J. Contribution of cooperative sector recycling to greenhouse gas emissions reduction: a case study of Ribeirão Pires, Brazil. **Waste management**. v. 33, p. 2771–2780, 2013.

KOU, G.; MIETTINEN, K.; SHI, Y. Multiple criteria decision making: challenges and advancements. **Journal of Mutli-Criteria Decision Analysis**. v. 18, p.1–4, 2011.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 4. ed. rev. e ampl. São Paulo: Atlas, 2001.

LAVEE, D. A cost-benefit analysis of a deposit–refund program for beverage containers in Israel. **Waste Management**. v. 30, p. 338–345, 2010.

LINKOV, I.; SATTERSTROM, F. K.; KIKER, G.; BATCHELOR, C.; BRIDGES, T.; FERGUSON, E. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: recent developments and applications. **Environment International**. v. 32, p. 1072–1093, 2006.

LIYALA, C. M. **Modernising solid waste management at municipal level: institutional arrangements in urban centres of East Africa**. Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 2011.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**. v. 37, p. 26–44, 2015.

LUHMANN, N. **Theory of society, vol.1**. Translated by Rhodes Barrett. Stanford: Stanford University Press, 2012.

MARELLO, M.; HELWEGE, A. **Solid waste management and social inclusion of waste pickers: opportunities and challenges**. Global Economic Governance Initiative – GEGI. Boston University. Paper 7. 2014. Disponível em: < <http://www.bu.edu/pardee/files/2014/09/Social-Inclusion-Working-Paper.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHSI, K. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste Management**. v. 33, p. 988-1003, 2013.

MATURANA, H.; VARELA, F. J. **Autopoiesis and cognition: the organization of the living**. Boston: Reidel, 1980.

MOLETTA, R.; VERRIER, D.; ALBAGNAC, G. Dynamic modelling of anaerobic digestion. **Water Research**. v. 20, n. 4, p. 427-434, 1986.

MORRISSEY, A. J.; BROWNE, J. Waste management models and their application to sustainable waste management. **Waste Management**. v. 24, n. 3, p. 297–308, 2004.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

OLIVEIRA, E. **O sistema de gestão dos resíduos sólidos em Juazeiro do Norte**. In: Reunião do projeto resurb. 2015, Fortaleza: Grupo de Estudo e Pesquisa em Infraestruturas de Transporte e Logística da Energia (GLEN).

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W. P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**. v. 30, p. 701–720, 2004.

ROUSSAT, N.; DUJET, C.; MÉHU, J. Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. **Waste Management**. v. 29, n. 1, p. 12–20, 2009.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process and health care problems**. New York: McGraw-Hill. 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**. v. 48, p. 9-26, 1990.

SCHULZE, C. **Municipal waste management in Berlin**. Berlin Senate Department for Urban Development and the Environment Communication, Berlin, Germany, 2013.

SEMASP. Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos. **Plano de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos - PGIRSU**. Secretaria de Meio Ambiente Agricultura e Serviços Públicos Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano - SEMASP. Juazeiro do Norte, Ceará, 2013.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015.

SILVA, E. R. **Modelagem matemática da produção e transporte de biogás em aterros sanitários**. 2010. 82 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, 2010.

SILVA, E. R. S. **Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento**. Tese (Pós-graduação em Energia) - Universidade Federal do ABC - Santo André – São Paulo, 2015.

SILVIA, M. C. G. **Utilização do método analytic hierarchy process (AHP) para localização de usina de reciclagem de resíduos da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2012.

SIQUEIRA, T. M. O.; ASSAD, M. L. R. C. L. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo (Brasil). **Ambiente e sociedade**. São Paulo, v. 18, n. 4, p. 243-264, 2015. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v18n4/1809-4422-asoc-18-04-00243.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

SISTEMIGRAMAS. **La diferencia entre sistemas “duros” y sistemas “suaves”**. Site enfoque sistêmico, 2009. Disponível em: < <https://sistemigramas.wordpress.com/2009/01/21/la-diferencia-entre-el-pensamiento-de-sistemas-duros-y-del-pensamiento-de-sistemas-suaves/>>. Acesso em: 28 out. 2015.

SOLTANI, A.; HEWAGE, K.; REZA, B.; SADIQ, R. **Multiple stakeholders in multicriteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review**. Waste Management. v.35, p. 318–328, 2015.

SOTO, M. M. T. **Análise e formação de redes de cooperativas de catadores de materiais recicláveis no âmbito da economia solidária**. Tese (Pós-graduação em Engenharia de Produção) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPRE) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SU, J. P.; CHIUEH, P. T.; HUNG, M. L.; MA, H. W. Analyzing policy impact potential for municipal solid waste management decision-making: a case study of Taiwan. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 51, n. 2, p. 418–434, 2007.

THEMELIS, N. J.; BARRIGA M. E. D.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M. G. **Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean**. Earth Engineering Center, Columbia University. Julho, 2013. Disponível em: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/files/WTEGuidebook_IDB.pdf>. Acesso em: 15 out. 2015.

TURNER, D. A.; KEMP, S.; WILLIAMS, I. Carbon footprinting in the UK waste management sector. **Carbon Management**. v. 2, p. 677–690, 2011.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Landfill gas emissions model v.3.02**. 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>>. Acesso em: 09 dez. 2015.

WASTELL, D. **System Thinking**: an introductory essay. Março, 2012. Disponível em: <http://www.managingbydesign.net/my_library/systems_thinking.pdf>. Acesso em: 31 out. 2015.

WEISTROFFER, H. R.; SMITH, C. H.; NARULA, S. C. **Multiple criteria decision support software**. In: Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys (Eds Figueira, J., Greco, S., and Ehrgott, M.), Springer, New York, p. 989–1018, 2005.

WILLIAMS, P. T. **Waste treatment and disposal**. 2. ed. John Wiley & Sons, Chippingham, UK, 2005.

WILSON, D. C. Development drivers for waste management. **Waste Management & Research**. v. 25, n. 3, p. 198-207, 2007.

WRIGHT, J. T. C.; GIOVINAZZO, R. A. Delphi: uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. **Caderno de Pesquisas em Administração**. v. 1, n. 12, 2º trimestre/2000.

WWF BRASIL. **Guia para a compostagem**: orientação para o aproveitamento de resíduos orgânicos em sistemas de pequeno e médio porte. Brasília, WWF-Brasil, 2015.

YAP H. Y.; NIXON J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**. 2015.

YOUNES, M. K.; NOPIAH, Z. M.; BASRI, N. E. A.; BASRI, H.; ABUSHAMMALA, M. F. M.; YOUNES, M. Y. Landfill area estimation based on integrated waste disposal options and solid waste forecasting using modified ANFIS model. **Waste Management**. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.020>>. Acesso em: 07 dez. 2015

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 01 - PESQUISA DE CAMPO

Caro Senhor(a),

Estou realizando uma pesquisa sobre Resíduos Sólidos Urbanos com apoio da Universidade Federal do Ceará, todas as informações prestadas serão consideradas confidenciais e utilizadas com finalidade acadêmica. O senhor (a), pode contribuir com algumas informações?

Agradeço sua colaboração!

SUBSISTEMA DE GERAÇÃO

1. Qual é a quantidade total de resíduos sólidos urbanos gerada pelo município de Juazeiro do Norte?
2. Qual é a composição Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos gerados pelo município de Juazeiro do Norte?

TIPO DE MATERIAL	%
Material Reciclável	%
*Metais	%
Aço	%
Alumínio	%
*Papel, papelão e tretapak	%
*Plástico total	%
Plástico filme	%
Plástico rígido	%
*Vidro	%
Matéria Orgânica	%
Outros	%
TOTAL	100,00%

3. Existe triagem de RSU nos domicílios?

SUBSISTEMA DE COLETA/TRANSPORTE

4. Qual é a quantidade total de RSU coletada na cidade?

_____ Toneladas/ano

TIPO DE MATERIAL	%
Material Reciclável	%
*Metais	%
Aço	%
Alumínio	%
*Papel, papelão e tretapak	%
*Plástico total	%
Plástico filme	%
Plástico rígido	%
*Vidro	%
Matéria Orgânica	%
Outros	%
TOTAL	100,00%

5. Quais os tipos de meio de transporte utilizado para coleta de RSU? Qual é o valor pago pela coleta de RSU? Quais são os destinos desses meios de transporte? Pode descrever o fluxo/rota desses meios de transporte?
6. Em relação ao serviço de coleta/transporte dos RSU: Qual o tipo de administração/responsável? De que forma é a execução de serviços?
7. Existem associações ou cooperativas de catadores de material reciclável? Quantas são? Quantos catadores são cadastrados em cada uma? Qual é o destino dos materiais dessas associações? Existe apoio da prefeitura para essas associações?
8. Quantos catadores avulsos existem? Existe apoio da prefeitura para essas pessoas?
9. Existem Ecopontos? Quantos

SUBSISTEMA DE TRATAMENTO

10. Existe algum centro de tratamento de RSU (físico, biológico ou térmico)? Caso sim, qual é o tipo de tratamento e qual é a quantidade de RSU tratada?
11. Em relação aos centros de tratamento de RSU: Qual é a sua localização? Qual o tipo de administração/responsável? De que forma é a execução de serviços? Qual é o tamanho da área? E quantos empregados possui?

SUBSISTEMA RUL – RECICLAGEM / UTILIZAÇÃO / DISPOSIÇÃO FINAL

12. Existem indústrias de reutilização/reciclagem de RSU no município? Caso sim, quantos?
13. Quais são os principais materiais recicláveis vendidos e qual é o preço de venda?

TIPO DE MATERIAL	PREÇO DE VENDA
Material Reciclável	R\$/Kg
*Metais	
Aço	
Alumínio	
*Papel, papelão e tretapak	
*Plástico total	
Plástico filme	
Plástico rígido	
*Vidro	
Outros	
TOTAL	

14. Qual é o tipo de disposição final de RSU da região? Qual é a quantidade de RSU disposto nele? Qual é a sua área? Onde está localizado? Quantas pessoas trabalham no local?

PLANEJAMENTO E INTERVENÇÕES FUTURAS

15. O que está sendo feito pela cidade para que a gestão de RSU esteja de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS)? Existem consórcios firmados ou em fase de negociação para gestão de RSU conjunta com outros municípios?
16. Existe algum planejamento realizado para a instalação de unidades de Ecopontos, Centros de triagem, Centros de Tratamento e Unidade de Disposição Final de RSU ?

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 02 - AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS

Caro Senhor(a),

O presente questionário tem como objetivo construir um modelo para definir a alternativa (ideal) de tratamento de resíduos sólidos urbanos. O estudo está sendo desenvolvido na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará.

Para responder o questionário, você deverá marcar em cada linha qual o grau de importância de um critério comparado com outro, segundo a escala fundamental de Saaty (1980), apresentada a seguir:

1	Igual Importância	As duas opções contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena	Uma opção contribui levemente mais em relação à outra.
5	Importância Grande	Uma opção contribui fortemente mais em relação à outra.
7	Importância Muito Grande	Uma opção contribui muito fortemente mais em relação à outra.
9	Importância Absoluta	Uma opção contribui com o maior grau de certeza em relação à outra.
2, 4, 6, 8;	Valores Intermediários	Quando se procura um grau de contribuição intermediário

1. Em relação à escolha da alternativa ideal de tratamento de resíduos sólidos urbanos, compare os seguintes critérios:

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Econômico																			Ambiental
Econômico																			Social
Econômico																			Técnico
Econômico																			Regulatório
Ambiental																			Social
Ambiental																			Técnico
Ambiental																			Regulatório
Social																			Técnico
Social																			Regulatório
Técnico																			Regulatório

2. Em relação ao critério econômico, compare os seguintes subcritérios:

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Custos																			Receita

3. Em relação ao critério ambiental, compare os seguintes subcritérios:

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Emissão de GEE																			Área de ocupação do aterro

ANEXO A – CICLO DE PALESTRA GLEN

Dia	Palestra	Palestrante	Cargo
13/08/2015	Resíduos Sólidos Urbanos: Gestão e Tecnologia	Prof. Dr. João José Hiluy Filho	Professor do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará (UFC)
09/09/2015	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos	Dr. Alceu Galvão	Titular da Coordenadoria de Saneamento Ambiental (Cosan)
21/09/2015	Tecnologias Renováveis de Geração de Energia	Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho	Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC)
01/10/2015	O Sistema de Gestão dos Resíduos em Juazeiro do Norte	José Eraldo Oliveira Costa	Superintendente da Autarquia Municipal do Meio Ambiente de Juazeiro do Norte – CE
08/10/2015	Estado da Arte das Metodologias de Avaliação de Empreendimentos de Grande Impacto Social	Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva	Professor da Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade da Universidade Federal do Ceará (UFC)