

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ.
PROGRAMA DE TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL DO CEARÁ**

RENATA FONTES CAVALCANTE

**ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
REGIÃO DO MACIÇO DE BATURITÉ
SOB O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

**FORTALEZA
2019**

RENATA FONTES CAVALCANTE

ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
REGIÃO DO MACIÇO DE BATURITÉ
SOB O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Titular Adeildo Cabral da Silva

Co-orientador: Dr. Francisco Humberto de Carvalho Júnior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

CAVALCANTE, RENATA FONTES CAVALCANTE.
ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA REGIÃO
DO MACIÇO DE BATURITÉ SOB A ÓTICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO / RENATA
FONTES CAVALCANTE CAVALCANTE. - 2019.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Humberto de Carvalho Júnior.

1. Valoração dos Resíduos Sólidos. 2. Potencial Energético do Biogás. 3. Modelo Tecnológico. I. Título.
CDD 628

RENATA FONTES CAVALCANTE

ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA
REGIÃO DOMACIÇO DE BATURITÉ
SOB O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

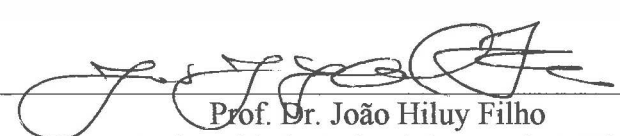
Dissertação aprovada pela coordenação do curso de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre

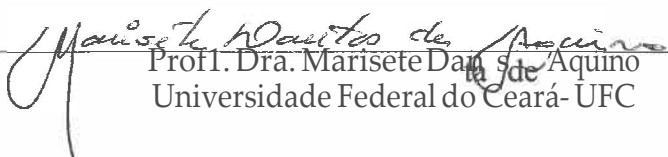
Aprovada em: 04/04/2019

BANCA EXAMINADORA


Prof. Titular. Adeildo Cabral da Silva (Orientador)
Instituto Federal do Ceará-IFCE


Profa. Dra. Adriana Guimarães Costa
Instituto Federal do Ceará-IFCE


Prof. Dr. João Hiluy Filho
Universidade Federal do Ceará - UFC


Prof. Dra. Marisete Damasceno Aquino
Universidade Federal do Ceará- UFC

Fortaleza

2019

DEDICATÓRIA

Esta Dissertação é dedicada a Deus que sempre esteve comigo.
Assim diz a Palavra de Deus: “*porque sem mim nada podereis
fazer*” (João 15:5).
A meus pais: Reginaldo e Regina.
Meu namorado e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito ao que agradecer nessa longa jornada:

Agradecer à Deus por ter me dado a sabedoria necessária para concluir essa etapa tão valorosa em minha vida;

Agradecer aos meus pais que sempre investiram em minha educação e me apoiaram em cada etapa e a minha irmã Rayane e ao meu irmão Reinaldo que tanto contribuiu em minha vida acadêmica sendo exemplo de inteligência e perseverança;

Agradecer ao meu namorado que me deu todo o suporte necessário para realização deste trabalho;

Agradecer aos meus Orientadores: Professor Adeildo, Professor Humberto, Professor Hlluy e Professor Luiz Tarelho por compartilharem os seus saberes para o enriquecimento e elaboração desta pesquisa.

Agradecer aos meus chefes Paulo Márcio e Caio Braz que sempre me ajudaram compreendendo as minhas ausências no trabalho para me dedicar a esta dissertação e ainda aos meus colegas de trabalho Fabiano, Marta e Válber que prontamente me ajudaram na revisão, formatação e edição deste estudo e;

Agradecer aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado me ajudando e me apoiando nesses 24 meses: Eliel e Raina.

RESUMO

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) mostrou que a geração de RSU no país, em 2016 é cerca de 78,3 milhões de toneladas, sendo 29,7 milhões de toneladas de resíduos com destino impróprio. Ainda de acordo com a ABRELPE a geração de RSU no Estado do Ceará somou um total diário de 9.809 mil toneladas e disposição final imprópria possuindo 301 lixões ativos, 04 aterros sanitários licenciados e apenas 01 destes com valoração energética. O objetivo geral desse trabalho é a proposição de alternativas tecnológicas de valoração dos resíduos sólidos domésticos a partir de estimativas do potencial do biogás para construção de cenários de curto e médio prazo na Região do Maciço de Baturité (CE), cuja a produção diária de resíduos é de 131kh/ton.dia. A metodologia para o alcance dos resultados foi dividida em etapas: estimativas e projeções incluindo as estimativas populacional, resíduos, composição gravimétrica, baseado na NBR10007/2004, escolha de alternativa de tecnologias (aterros e biodigestor), estimativa do potencial do biogás e potencial elétrico em aterros e em biodigestores e construção de cenários em curto prazo no período de 05 anos e médio prazo período de 10 anos. A composição gravimétrica para a região foi de 88% de materiais reaproveitáveis e recicláveis (secos e úmidos) e apenas 12% são rejeitos que se manteve para os anos futuros. Para o cenário curto prazo ano de referência 2024 estimou-se uma geração média de resíduos de 131.789,39 toneladas, um potencial de geração de biogás 3.737.439,95 (m^3CH_4/tRs) e uma Potência Elétrica útil de 221.755,02 Kw/h. Para o cenário previsto para o ano de 2028 com a implantação da Central de Valoração Orgânica (CVO), estimou-se um potencial de biogás 10.053.126,36 $m^3CH_4/ton.ano$ e uma potência elétrica de 843.403,78 Kw/h. Concluiu-se o alto potencial de geração de energia e combustível, principalmente devido a elevada geração de resíduos sólidos orgânicos putrescíveis e poda, onde essa energia ou combustível pode ser aproveitada no sistema de gestão integrada de resíduos sólidos, trazendo sustentabilidade econômica, ambiental e social na Região do Maciço de Baturité.

Palavras chaves: Valoração dos Resíduos Sólidos, Potencial Energético do Biogás, Modelo Tecnológico.

ABSTRACT

The Brazilian Association of Public Cleaning and Special Waste Companies (ABRELPE) showed that the generation of urban solid waste in 2016 was about 78.3 million tons, being 29.7 million tons of waste destined for improper use (ABRELPE, 2017). As stated by ABRELPE, the generation of urban solid waste in the state of Ceará added a daily total of 9,809 thousand tons and improper disposal with 301 active dumps, 04 licensed sanitary landfills and only 01 of these with energy recovery. The general objective of this work is the proposal of technological alternatives for valorization of domestic solid waste based on estimates of biogas potential for the construction of short and medium term scenarios in the Maciço de Baturité Region. The methodology for reaching the results was divided into stages: estimates and projections including population estimates, waste, gravimetric composition, based on NBR10007 / 2004, choice of alternative technologies (landfill and biodigester), biogas potential estimation and electric potential in landfills and in biodigesters and short-term construction scenarios in the period of 5 years and medium-term period of 10 years. The gravimetric composition for Maciço de Baturité region was 88% of reusable and recyclable materials (dry and wet) and only 12% were waste that remained for future years. For the short-term scenario reference year 2024 an average generation of waste of 131,789.39 tons was estimated and a biogas generation potential of 3,737,439.95 ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{tRs}$) as well as useful electric power of 221,755.02 Kw/h. For the scenario predicted for the year of 2028 with the implementation of The Organic Valorization Center (CVO), a biogas potential of 10,053,126.36 m^3CH_4 tons per year and 843,403.78 Kw/h of electric power was estimated. It was concluded that the high potential of energy and fuel generation, mainly due to the high generation of organic putrescible wastes and prunings, where this energy or fuel can be used in the integrated solid waste management system, bringing economic sustainability, environmentally and socially and in the Region of Maciço de Baturité.

Keywords: Solid Waste Evaluation, Biogas Potential, Technological Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Alguns modelos atuais do manejo de resíduos sólidos urbanos no Brasil	21
Figura 02 – Mapa de Regionalização da Gestão de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará.....	23
Figura 05 - Localização das Áreas degradadas da Região do Maciço do Baturité.....	30
Figura 06 – Layout esquemático do CMR	33
Figura 07 – Pilares do Modelo Tecnológico Proposto para o Estado do Ceará	34
Figura 08 – Percentual das fontes de energia em 2017 no Brasil.....	37
Figura 09 - Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos.....	43
Figura 10 - Processos da digestão anaeróbia	45
Figura 11- Fluxograma das Etapas dos procedimentos Metodológico.....	50
Figura 12 – Tambores utilizados para realização da caracterização física dos RS	54
Figura 13 – Lona utilizada para a realização da composição gravimétrica dos resíduos	54
Figura 14 – Quarteamento de resíduos realizado in loco.	55
Figura 15 - Esquematização do Processo de Quarteamento de Resíduos Sólidos	55
Figura 16 - Fluxograma do Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a curto prazo	71
Figura 17 - Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a curto prazo	72
Figura 18 - Fluxograma do Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a médio prazo.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Percentuais do Materiais recicláveis da Região	63
Gráfico 02 - Estimativa da Potência Elétrica (2019-2024).....	70
Gráfico 03 - Evolução da geração da composição dos resíduos no cenário de referencial	75
Gráfico 04 - Potencial Energético da CVO em 2028	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Massa total e per capita de resíduos indiferenciados gerados por dia nos municípios da Região do Maciço de Baturité	27
Tabela 02 – Estimativa Populacional e de Resíduos Sólidos domiciliares nos municípios da Região do Maciço de Baturité para os anos de 2019,2024 e 2028.	62
Tabela 03 - Composição Gravimétrica dos Resíduos da Região do Maciço de Baturité	64
Tabela 04– Comparativo de composição gravimétrica	65
Tabela 05 - Estimativa de geração por tipo de Resíduos do Maciço de Baturité	67
Tabela 06 - Estimativa de Vazão de Metano e Potencial Elétrica	69
Tabela 07 - Comparativos entre o Biogás da RMB no ano de 2019 com outras fontes de combustível.....	69
Tabela 08 - Estimativa do Potencial econômico dos Resíduos Sólidos do Maciço de Baturité	74
Tabela 09 - Comparativos entre o Biogás estimado da RMB no ano de 2028 com outras fontes de combustível.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Composição dos principais constituintes do biogás	40
Quadro 02 - Quantidade de Biogás equivalente a outros combustíveis.....	40
Quadro 03 – Tipos de resíduos por categoria	56

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
APA	Área de Proteção Ambiental
CMR	Central Municipal de Resíduos
CVO	Central de Valoração Energética
CH ₄	Metano
CO ₂	Dioxido de Carbono
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNR	Gás Natural Renovável
LandGEM	<i>Landfill Gas Emissions Model</i>
KWh	Kilowatt Hora
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MWh	<i>Megawatt</i> Hora
RMB	<i>Região Maciço de Baturité</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRGIRS	Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PCSM	Plano de Coletas Seletivas Múltiplas
RS	Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
Ton	tonelada
WTE	<i>Waste to Energy</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral.....	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. Problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	18
2.1.1. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbano – Brasil	19
2.1.2. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbano - Estado do Ceará	21
2.1.3. Panorama da área em Estudo.....	24
2.2. Modelo Tecnológico e Rota Tecnológica.....	31
2.3. Modelo Tecnológico Proposto para Gestão de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará33	
2.4. Panorama Energético no Brasil e no Ceará	36
2.5. Geração de Energia através de Resíduos Sólidos Urbano	38
2.5.1. Biogás	39
2.6. Tecnologias de Tratamento de Resíduos com Geração de Energia.....	41
2.6.1. Incineração	41
2.6.2. Pirolise.....	42
2.6.3. Aterros Sanitários	42
2.6.4. Digestão anaeróbia	43
2.7. Métodos de Estimativa para Valoração Energética	46
2.7.1. Modelo de estimativa de geração de CH ₄ e CO ₂ em aterro.	47
2.7.2. Modelo de estimativa do Potencial do Biogás em Aterros Sanitário	48
2.7.3. Modelo de estimativa da energia elétrica gerada em Biodigestores.....	49
2.7.4. Modelo de estimativa da energia elétrica gerada em Incineradores.....	49
3. METODOLOGIA	50
3.1. Caracterização da área em Estudo	51
3.2. Análise de Alternativas de Tecnologias de Geração de Energia a partir do Resíduos51	
3.3. Estimativas e Projeções para valoração de resíduos sólidos.....	52
3.3.1. Estimativa Populacional	52
3.3.2. Estimativa de Resíduos Sólidos Urbanos	52
3.3.3. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos.....	53
3.3.4. Amostras dos resíduos	53
3.4. Estimativa do Potencial Energético	56

3.4.1.	Estimativa do Potencial de Biogás e Potência Elétrica em Aterros Sanitários.....	57
3.4.2.	Estimativa do Potencial de Biogás e Potência Elétrica em Biodigestores	58
3.5.	Construção dos Cenários em Curto e Médio Prazo da Gestão de Resíduos no Maciço de Baturité	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1.	Estimativa e Projeções	61
4.1.1.	Caracterização dos RSU da Região do Maciço de Baturité.....	62
4.2.	Escolha de Tecnologias.....	65
4.3.	Cenários	66
4.4.	Cenário Curto Prazo.....	66
4.4.1.	Coleta e Destinação final	66
4.4.2.	Disposição Final	68
4.5.	Cenário Médio Prazo - 2028	73
4.5.1.	Coleta diferenciada e Destinação Final	73
4.5.2.	Central de Valoração Orgânica	75
4.5.3.	Disposição Final	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	80
	REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) existem desde quando o homem deixou o estilo de vida nômade. Contudo, o acentuado crescimento demográfico e o consumo desenfreado da sociedade capitalista, que surge a partir da revolução industrial, aumentou a geração de resíduos tornando-o um problema ambiental contemporâneo.

A disposição de resíduos no meio ambiente de forma inadequada causa impactos adversos nos oceanos, rios, ar e até mesmo na rotina cotidiana de muitos seres humanos. Acrescenta-se, ainda, que são necessários elevados investimentos para o tratamento e disposição final, tanto pela quantidade, quanto pela qualidade dos resíduos gerados.

No Brasil o tema vem sendo amplamente discutido pela sociedade acadêmica, governo e organizações não governamentais, englobando várias áreas do conhecimento sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Embora vistos, na maioria das vezes, como um problema para a sociedade, os resíduos podem ser matérias primas e formas de insumos para diversas áreas produtivas como no aproveitamento energético. Essas medidas são apoiadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305/ 2010 e da Lei N ° 16.032/2016 que instituiu a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) do Ceará que passaram a impor ao poder público e ao setor privado normas de tratamento e destino dos RSU, sendo os municípios responsáveis pelo recolhimento, segregação e destinação/disposição adequada dos mesmos.

Paralelamente, o Brasil apresenta problemas no setor de oferta de eletricidade devido a dependência hidrelétricas (responsável por 65% da matriz de oferta) em um país que vivencia frequentemente crises hídricas principalmente na região Nordeste. De acordo com o Panorama Energético do Estado do Ceará as termoeletricas representam a maior fonte de geração de energia causando grandes impactos ambientais com emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Nesta conjuntura, as usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos (Waste To Energy - WTE) surgem como alternativa de investimento que poderia trazer benefícios tanto para a gestão dos RSU quanto para o setor elétrico brasileiro (HAUSER, 2007). As tecnologias térmicas de geração de energia através de resíduos sólidos usam métodos térmicos que recuperam a energia armazenada nos resíduos, ajudam na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), diminuem o volume dos resíduos e, conseqüentemente, reduzem a utilização de espaço para disposição final (MATA-ALVAREZ,2003).

Um Modelo Tecnológico de Resíduos privilegia uma coleta diferenciada e uma gestão integrada dos resíduos sólidos, com inclusão de catadores e compartilhamento de responsabilidade com os diversos agentes. Visa também a minimização da geração, a disposição final exclusivamente dos rejeitos, de forma ambientalmente adequada e a valoração econômica e social dos resíduos. Requer um planejamento preciso do território, com a definição do uso compartilhado das redes de instalações para o manejo de diversos resíduos, e com a definição de uma logística de transporte adequada e com baixos custos.

Para minimizar esses problemas, o Estado do Ceará por intermédio da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), lançou no ano de 2017 o Plano de Coleta Seletiva Múltiplas, que prevê alternativas para destinação final dos resíduos, propondo um modelo tecnológico para a região do Maciço de Baturité, entretanto ainda não foi proposto alternativas tecnológicas de aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos gerados. Ressalta-se que dentre os 184 municípios existente no Estado do Ceará, apenas o município de Fortaleza possui uma tecnologia para aproveitamento energético a partir dos resíduos sólidos. Diante do atual cenário, se faz imprescindível esforços no estudo de estimativa do potencial de energia gerada a partir dos resíduos sólidos e propor alternativas tecnológica ao modelo adotado pelo Governo do Estado do Ceará.

Diante disto, optou-se por trabalhar a Região do Maciço de Baturité, em virtude, da carência na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, em especial quanto à disposição e destinação inadequada desses resíduos na Região do Maciço. Outros motivos são: 1 a situação socioeconômica da área, já que os municípios são turísticos inseridos e/ou próximos à região serrana, dentro de uma Área de Proteção Ambiental (APA), reforçando a necessidade de implementação de medidas sustentáveis voltadas à preservação dos recursos naturais; 2 – por estar em uma APA e possuir terreno muito íngreme, se faz necessário uma rota adequada que evite acidentes nas estradas, bem como derramamento de resíduos ao longo da viagem, evitando, portanto, quaisquer tipos de riscos.

Aproveitar, tratar e destinar os RSU é uma responsabilidade da qual a sociedade não tem como se esquivar. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é integrar a centrais municipais de resíduos uma tecnologia de valoração energética dos resíduos sólidos estimado para a Região do Maciço de Baturité.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é a preposição de alternativas tecnológicas de valoração dos resíduos sólidos domésticos a partir de estimativas do potencial do biogás para construção de cenários de curto e médio prazo na Região do Maciço de Baturité.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar o diagnóstico da gestão de resíduos sólidos da área em estudo;
- Estimar a população e a geração de resíduos sólidos da região no período de 10 anos;
- Calcular a composição gravimétrica dos resíduos sólidos da região a partir do quarteamento;
- Estimar o potencial energético dos resíduos sólidos tratados em aterro sanitário no período de 05 anos;
- Estimar o potencial energético dos resíduos sólidos orgânicos úmidos putrescíveis no período tratados em biodigestores para o ano 2028;
- Estimar o potencial econômico da comercialização dos resíduos recicláveis e dos gases gerados;
- Propor alternativas de gestão de resíduos ao modelo tecnológico adotado pelo Estado do Ceará.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A vida contemporânea principalmente em áreas urbanas impõe um modelo de relações produtivistas e consumistas, que por sua vez inviabilizam o gerenciamento de resíduos sólidos. O desperdício torna-se um reflexo do nosso alto padrão de consumo e a sociedade torna-se responsável pelos Resíduos Sólidos Urbano (RSU) gerados. Moraes (2011), frisa que devido ao avanço tecnológico, onde os produtos estão com sua vida útil reduzida, o uso de descartáveis é frequente e a cada dia geram-se mais resíduos sólidos com características complexas, tornando difícil seu manejo, tratamento e disposição final.

De acordo com Gardner (2012), cerca de 1,3 bilhões de toneladas de RSU são geradas por ano no planeta e estima-se que essa quantidade poderá dobrar em 2025. Quase a metade desse total é gerada por menos de 30 países, os mais desenvolvidos do mundo, como por exemplo, os Estados Unidos, onde a geração de RSU somou 258,5 milhões de toneladas em 2014 e a taxa de reciclagem se manteve praticamente estagnada em torno de 34,6%, segundo estatísticas divulgadas pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) norte-americana (CEMPRE, 2014).

A Organização Econômica de Cooperação e Desenvolvimento (OECD) afirma que a soma de lixo gerado na Europa cresceu 10% entre 1990 e 1995; e para 2020, estima-se que poderão ser gerados 45% mais lixo do que em 1995. Assim, em 2008, a União Europeia aprovou uma diretriz pela qual 50% de todos os seus resíduos deverão ser reciclados até 2020 (COMISSÃO EUROPEIA, 2018). Segundo a revista Em Discussão (2014), a gestão de resíduos no Japão incorpora toda a cadeia da produção e destinação do lixo e diminui consideravelmente as emissões de dioxinas e outros poluidores de usinas de incineração.

No Brasil, a primeira vez que a palavra lixo assumiu a nomenclatura de Resíduo Sólido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas desde NBR 10.004/1987 posteriormente atualizada para NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004):

“Resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível.”

Todavia, devido aos diversos problemas encontrados com relação aos Resíduos Sólidos (RS), em 2010 foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fundamentada na Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), regulamentada por meio do Decreto nº 7.404/2010 (BRASIL, 2010a), na qual reúnem princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão dos mesmos. Além de responsabilizar as empresas pelo recolhimento de produtos descartados (logística reversa), estabelece a integração de municípios na gestão dos resíduos e responsabiliza toda a sociedade pela geração de resíduos sólidos.

A referida lei 12.305/2010, trouxe um novo conceito para o termo rejeito que consiste:

Rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Desta forma, apresentando uma diferença primordial do termo resíduo para o rejeito uma vez que “resíduo” se refere à possibilidade de valorização através do reuso, reciclagem, compostagem, produção de insumo ou energia, já a palavra rejeito passa a ideia de impossibilidade de usos alternativos futuros (MENDEZ, 2017).

2.1.1. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos – Brasil

No Brasil há uma grande dificuldade na obtenção de dados seguros e detalhados a respeito dos resíduos sólidos, muitas vezes, encontram-se situações conflitantes de estimativas acerca da quantidade de resíduos gerados (HENRIQUES, 2004). A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2017) revela que a geração de RSU no país em 2016 foi de quase 78,4 milhões de toneladas, na qual 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram coletados e consequentemente tiveram destino impróprio.

A disposição final dos RSU no Brasil, conforme ABRELPE (2017) demonstrou percentual de 58,4%, sendo 41,7 milhões de toneladas enviadas para aterros sanitários e a maioria dos municípios ainda perdura a problemática dos lixões com a presença de catadores e crianças. Isto representa do ponto de vista político e social uma ineficiência, consequência da ausência de gestão e gerenciamento dos resíduos municipais. Essas questões deveriam ser tratadas de forma integrada e estratégica, considerando os fatores ambientalmente seguros, economicamente viáveis e socialmente aceitáveis.

A quantidade de materiais descartados pela população brasileira continua a aumentar, tanto em termos absolutos, quanto individualmente. Segundo Jucá (2012), o Brasil é

o 5º maior gerador de rejeitos do mundo. Este setor movimentou algo em torno de R\$28,5 bilhões/ano, o que representa R\$10,37 por habitante por mês.

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) a quantidade de resíduos gerados em um país está correlacionada à evolução de sua população, ao nível de urbanização, ao poder de compra dos habitantes, entre muitos outros fatores. Estudos mostram que o nível de aumento da geração de resíduos acompanha o ritmo de crescimento do PIB. Portanto, a geração dos RSU está vinculada ao consumo, notadamente nas cidades mais ricas economicamente (PEDROZA *et al.*, 2012).

Dados do ABRELPE (2017) mostraram que a média encontrada para a região Nordeste de geração dos resíduos domiciliares *per capita* foi de 0,969 kg/hab./dia, sendo a segunda maior *per capita* do país. Outro fator que merece destaque é em relação a disposição final dos resíduos que registrou um aumento de 0,5% da quantidade de resíduos dispostos em Lixões.

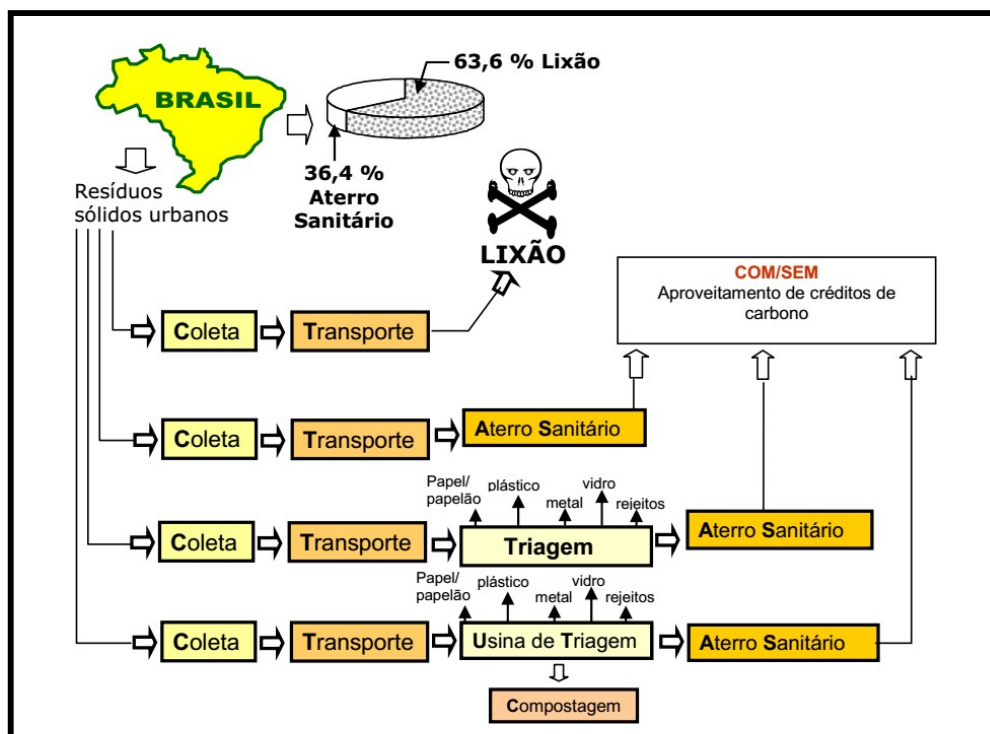
Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 10.007, 2004), a caracterização física dos resíduos sólidos consiste na determinação dos constituintes e suas respectivas porcentagens em peso, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser físico, químico e biológico. Na verdade, a caracterização é muito mais ampla pois abrange também o peso específico ou densidade dos resíduos, a relação Carbono/Nitrogênio (C/N); o PH; as condições do estado da matéria, entre outras. Neste caso, não se pode confundir caracterização com gravimetria ou tipologia dos resíduos.

A caracterização dos RSU é um dos passos pelo qual se inicia a gestão e o gerenciamento, pois suas características sofrem a influência de vários fatores tais como: número de habitantes do município, poder aquisitivo da população, hábitos e costumes da população, nível educacional, condições climáticas entre outros. A partir dessas informações é possível aprimorar o planejamento, além de auxiliar no dimensionamento dos equipamentos e instalações necessárias, na escolha da tecnologia apropriada. (CONSONI *et al.*, 2010)

A importância da definição das características dos resíduos sólidos de acordo com sua composição está relacionada à escolha da melhor tecnologia para o manuseio, tratamento e/ou aproveitamento e destinação final dos resíduos sólidos (BARROS *et al.*, 2007). Sendo assim, esse processo é um importante instrumento de gestão que permite subsidiar o planejamento das atividades do serviço de limpeza urbana, avaliar o potencial de reutilização, reciclagem e recuperação do resíduo, geração de energia, bem como identificar especificidades e características qualitativas e quantitativas que variam em função de alguns fatores, tais como: sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos (LIMA, 2004).

No Brasil 51,4% dos resíduos sólidos urbanos são compostos por matéria orgânica; todavia, tecnologias de compostagem não possuem quantidade representativa (DEUS et al., 2017). O motivo deve estar atrelado ao manejo, inadequado, realizado pela maioria dos municípios, que pode ser visto na figura 01.

Figura 01 – Alguns modelos atuais do manejo de resíduos sólidos urbanos no Brasil.



Fonte: Morejon et al, 2011.

Ainda segundo os autores supracitados, em 2008, somente 3,8% dos municípios brasileiros possuíam acesso a usinas de compostagem e cerca de 11,6% dos municípios destinavam os RSU as usinas de reciclagem. Quase uma década depois e o cenário é praticamente o mesmo, segundo o diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos, desenvolvido pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS (2014), apenas 2,5% dos resíduos são enviados para unidade de triagem, e 0,4% para compostagem. O estudo foi realizado para 3.765 dos 5.570 municípios do território nacional.

2.1.2. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbano - Estado do Ceará

A produção de RSU 2016 no Estado do Ceará totalizou um volume de 9.809 mil toneladas e índice de cobertura de coleta de 78,27% (ABRELPE, 2017). De acordo com o último Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Sistema Nacional de Saneamento Ambiental (2016) o indicador médio per capita no Estado foi 1,37 kg/hab./dia, apresentando uma diminuição comparada ao ano anterior, onde a média da geração per capita

foi de 1,56 kg/hab./dia e já foi considerada a mais alta do país. Conforme Carvalho, (2013), esse fato justifica-se devido ao consumismo retraído quando havia um incentivo governamental na década anterior e uma cultura de desperdício.

A coleta e o transporte dos Resíduos ainda são realizados de forma precária e deficitária, e que de acordo com o Panorama realizado no ano de 2016, apenas 38% dos municípios possuem caminhão compactador.

No tocante à disposição final de acordo com a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), no ano de 2017 foram contabilizados 301 lixões, apenas 04 aterros sanitários licenciados, e que dentre os 184 municípios pertencentes ao Estado, 178 dispõem os seus resíduos em lixões, ou seja um percentual de 97% desses ainda queimam os seus resíduos a céu aberto, incluindo resíduos de serviços de saúde, não existindo nenhuma proteção ao lençol freático e um gerenciamento ineficiente da administração desses locais. (PRGIRS, 2018).

Em 2012, o Governo do Estado do Ceará, elaborou estudos para o planejamento da política dividindo os 184 municípios em 14 Regionais de gestão integrada de resíduos sólidos (Figura 02), visando um gerenciamento integrado e consorciado entre os municípios (TRAMITY, 2012).

No ano de 2016 o Estado do Ceará revogou e atualizou a Política Estadual de Resíduos Sólidos instituída pela Lei 16.032/2016, no qual, concordando com os princípios, objetivos e instrumentos da PNRS, priorizando a integração dos catadores, incentivando uma política regionalizada através de repasse de recursos financeiros aos municípios que optarem por se consorciar.

no qual se encontra em fase de elaboração para os outros 101 municípios com a previsão de entrega no ano de 2019, Planos Regionais da Gestão Integrada de Resíduos (PRGIRS) de 11 regiões ou 159 municípios finalizado no ano de 2018.

Segundo a SEMA todos esses planos objetivaram estimular a implantação da coleta seletiva nos municípios adotando um modelo tecnológico para destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos gerados e apoiar a estruturação dos consórcios para a implantação da Política Regionalizada de Resíduos Sólidos (PRGIRS, 2018).

2.1.3. Panorama da área em Estudo

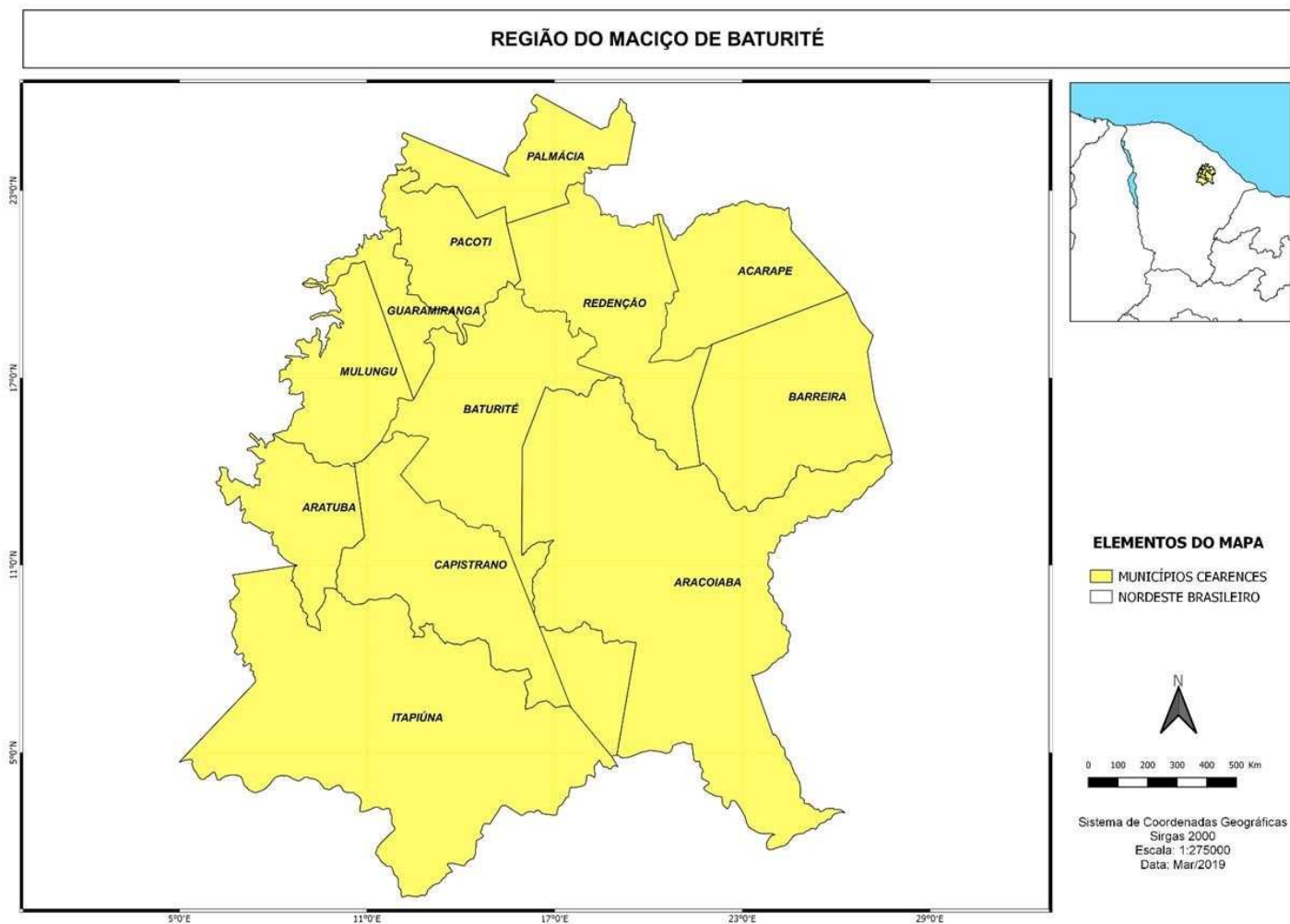
A área de estudo deste trabalho é a Região do Maciço de Baturité definida pela a Regionalização Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos no Estado do Ceará, composta atualmente por 12 municípios sendo eles: Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Pacoti, Palmácia, Redenção, no qual, se difere da divisão territorial realizada pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), com 13 municípios abrangendo o município de Ocara.

O acesso à Região se dá por meio da malha rodoviária e ferroviária. Entre a malha rodoviária, destaca-se a rodovia estadual CE - 060, que liga o município de Fortaleza até o município de Itapiúna, passando por quase todos os municípios do chamado sertão do Maciço do Baturité, com exceção dos municípios de Barreira e Baturité, sendo o acesso pelo Município de Acarape, por meio da rodovia estadual CE - 354. A Rodovia estadual CE-356, liga a rodovia estadual CE - 060 a rodovia estadual CE - 065, que interliga todos os municípios da chamada região serrana do Maciço do Baturité (CEARÁ, 2012).

O Maciço abriga reservas da APA do Rio Pacoti e o Corredor Ecológico do Rio Pacoti, estabelecidas pelo dispositivo legal Decreto nº 32.164, de 02 de março de 2017, envolvendo os municípios de Aquiraz, Itaitinga, Pacatuba, Guaiúba, Horizonte, Palmácia, Pacoti, Pacajus, Acarape e Redenção. Outra Unidade de Conservação da Região, estabelecida pelo Decreto nº 20.956, de 18 de setembro de 1990 e pela alteração realizada no Decreto nº 24.958, de 05 de julho de 98, é a APA da Serra do Baturité, com uma extensão de cerca de 30,2 mil hectares, englobando os municípios de Baturité, Pacoti, Guaramiranga, Mulungu, Redenção, Palmácia, Aratuba, Capistrano, Caridade e Canindé. Além desta, há uma reserva indígena localizada no Município de Aratuba.

O mapa da Figura 03 apresenta a localização da sede municipal georreferenciada bem como os recursos hídrico, rodovias e ainda as áreas degradadas pela disposição inadequada dos resíduos sólidos da Região

Figura 03 – Mapa de Regionalização da Gestão de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará



Fonte: GAIA, 2018, adaptada pelo autor,(2019)

No âmbito da economia o Produto Interno Bruto (PIB), que representa a riqueza da Região, foi de R\$ 1.789.742 em 2015, (IBGE, 2010; IPECE, 2017). Os municípios da região são responsáveis pela geração de aproximadamente 1,3% do PIB do Estado, sendo Baturité responsável por 0,3% do PIB estadual (CEARÁ, 2012).

A distribuição da atividade econômica entre os municípios e microrregiões mostra que zonas próximas às áreas serranas (pé de serra) tem maior parcela econômica que a do Sertão e da Serra. Quando se verifica a distribuição do PIB por habitante, infere-se, que a industrialização de Acarape e Redenção contribuíram para o aumento da riqueza.

A concentração do rendimento nos municípios aferido pelo Censo do IBGE em 2010, no entanto, ainda é baixa, sendo semelhante para todos os municípios da região, com quase 85% da população recebendo até um salário mínimo e 11% recebendo de 1 a 2 salários mínimos (CEARÁ, 2017).

Ressalta-se que a região é historicamente baseada na agricultura e extrativismo, atualmente é impulsionada pelo turismo, estando no topo da pirâmide econômica representada pelo setor de serviços, sendo este fator bastante relevante para a implantação de tecnologias de ganho ambiental e energético

Nos municípios de Palmácia, Pacoti, Guaramiranga, Mulungu e Aratuba, apresenta sérias limitações para exploração agrícola, devido ao forte relevo acidentado e a existência da APA do Maciço de Baturité, no entanto, apresenta fatores favoráveis ao desenvolvimento da agricultura como a fertilidade do solo, a regularidade das chuvas e a ocorrência de temperaturas amenas. Todavia, os municípios Baturité, Guaramiranga, Pacoti e Palmácia se destacam na produção de flores e plantas ornamentais (BRASIL, 2010).

- **Gerenciamento de Resíduos na Região do Maciço de Baturité**

A região do Maciço de Baturité gera diariamente 139,8 toneladas de resíduos domiciliares indiferenciados (Tabela 1), o que representa uma geração per capita média de 1,3kg/ hab.dia (CEARÁ, 2017).

Tabela 1 – Massa total e per capita de resíduos indiferenciados gerados por dia nos municípios da Região do Maciço de Baturité.

Município	Resíduos gerados total (ton./dia)	Resíduos gerados <i>per capita</i> (kg./hab. dia)
Acarape	16,7	2
Aracoiaba	9	0,6
Aratuba	4,1	1,1
Barreira	18,9	2,2
Baturité	17,1	0,7
Capistrano	1,8	0,3
Guaramiranga	8,6	3,9
Itapiúna	14,1	1,5
Mulungu	15	3,2
Pacoti	9,8	2
Palmácia	2,8	0,5
Redenção	21,9	1,4
Maciço de Baturité	139,8	1,3

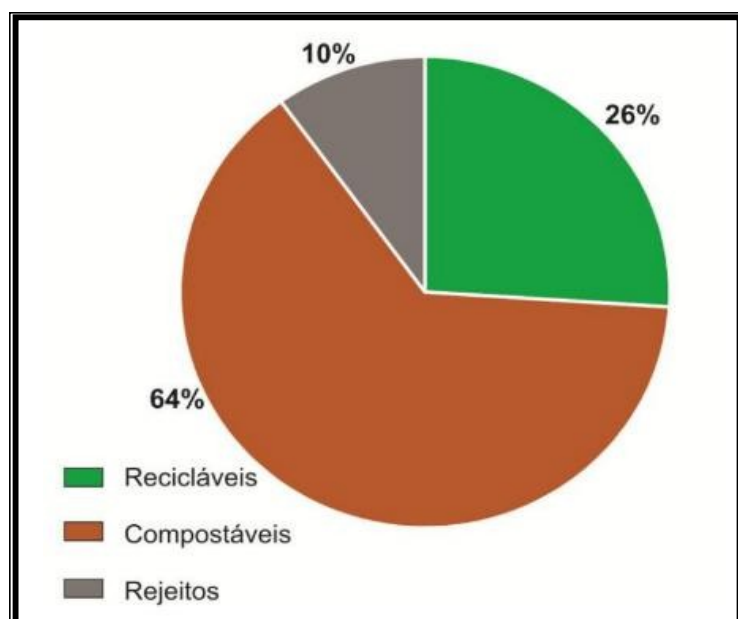
Fonte: I&T - Levantamento de dados em campo junto aos órgãos municipais gestores dos serviços, 2017.

Nota: Os dados foram estimados calculados considerando o número de viagens e a capacidade dos veículos.

As quantidades de resíduos foram calculadas a partir dos tipos de veículos e da quantidade de viagens que eles realizavam por semana. Entre os doze municípios, cinco deles obtiveram uma geração *per capita* acima de 2 quilos por habitante. Em três deles, essa alta na geração foi justificada pelo fato de serem municípios turísticos, da região serrana do Maciço de Baturité, com uma população sazonal elevada (Pacoti, Guaramiranga e Mulungu). Além destes, merecem destaque os municípios de Capistrano e Palmácia, que obtiveram uma geração abaixo dos 0,5 quilos por habitante.

De acordo com os Planos de Coletas Seletivas Múltiplas (PCSM) da bacia hidrográfica metropolitana da região do Maciço do Baturité realizado pela SEMA (2017) a composição gravimétrica dos resíduos da Regional (Figura 04) mostra que 26% dos resíduos gerados, são recicláveis e 64% são compostáveis, ou seja 90% dos resíduos podem ser reaproveitados, com a implantação de uma coleta diferenciada e uso de tecnologias adequadas.

Figura 04 – Composição gravimétrica da Região do Maciço de Baturité.



Fonte: SEMA, 2017.

Segundo referido Plano, todos os resíduos coletados na Região são levados para lixões. Contudo, nem todos os municípios possuem lixões ativos em seus territórios, especialmente aqueles que estão localizados na Área de Proteção Ambiental (APA), pois não podem dispor resíduos em seus territórios. É o caso dos municípios de Pacoti, Guaramiranga e Mulungu, que transportam seus resíduos para o lixão do município de Baturité.

Os municípios da Região do Maciço de Baturité realizam, em muitos casos, coleta conjunta com outros tipos de resíduos: da construção civil, volumosos e resíduos verdes. Dificultando o controle dos resíduos gerados nestas localidades, sendo realizada apenas uma estimativa das quantidades geradas, avaliadas pelo número de viagens recebidas, tipo de resíduo transportado e capacidade volumétrica dos veículos (CEARÁ, 2017).

- **Coleta e transporte**

A região do Maciço é atendida pela coleta de resíduos domiciliares com índices superiores a 70%, com exceção, do Município de Aratuba, que possui cobertura para apenas 45% da população (PCSM, 2017). O documento afirma ainda que apenas os municípios de Barreira e Mulungu realizam coleta de resíduos domiciliares e varrição em conjunto, obtendo duas formas de coletas, uma para os resíduos da construção civil, outra para resíduos verdes e volumosos.

Nos municípios de Baturité, Guaramiranga, Pacoti e Palmácia, os resíduos domiciliares e de varrição são coletados em conjunto com os resíduos volumosos, distinguindo assim os resíduos verdes e resíduos da construção civil, que são coletados conforme a disposição em vias públicas. Os municípios de Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Itapiúna e Redenção ainda realizam uma coleta conjunta, distinguindo apenas os resíduos da construção civil em uma coleta distinta.

Em Aracoiaba e Itapiúna, se houver disposição de resíduos verdes em vias públicas no momento da coleta dos resíduos da construção civil, aqueles são coletados com os Resíduos de Construção Civil. Apenas o município de Capistrano não possui nenhum tipo de coleta “segregada”, realizando a coleta de todos os resíduos dispostos em vias públicas. Os resíduos de grandes geradores são coletados juntamente com os resíduos domiciliares.

- **Situação dos Catadores.**

Os catadores de material reciclável contribuem com a coleta e o tratamento dos resíduos, inclusive são os únicos agentes que ajudam a minimizar os impactos causados com a disposição inadequada. De acordo com o PCSM da região foi realizado um trabalho de entrevista e cadastramento com esses indivíduos no ano de 2017, no qual foi contabilizado aproximadamente 121 catadores atuantes na região.

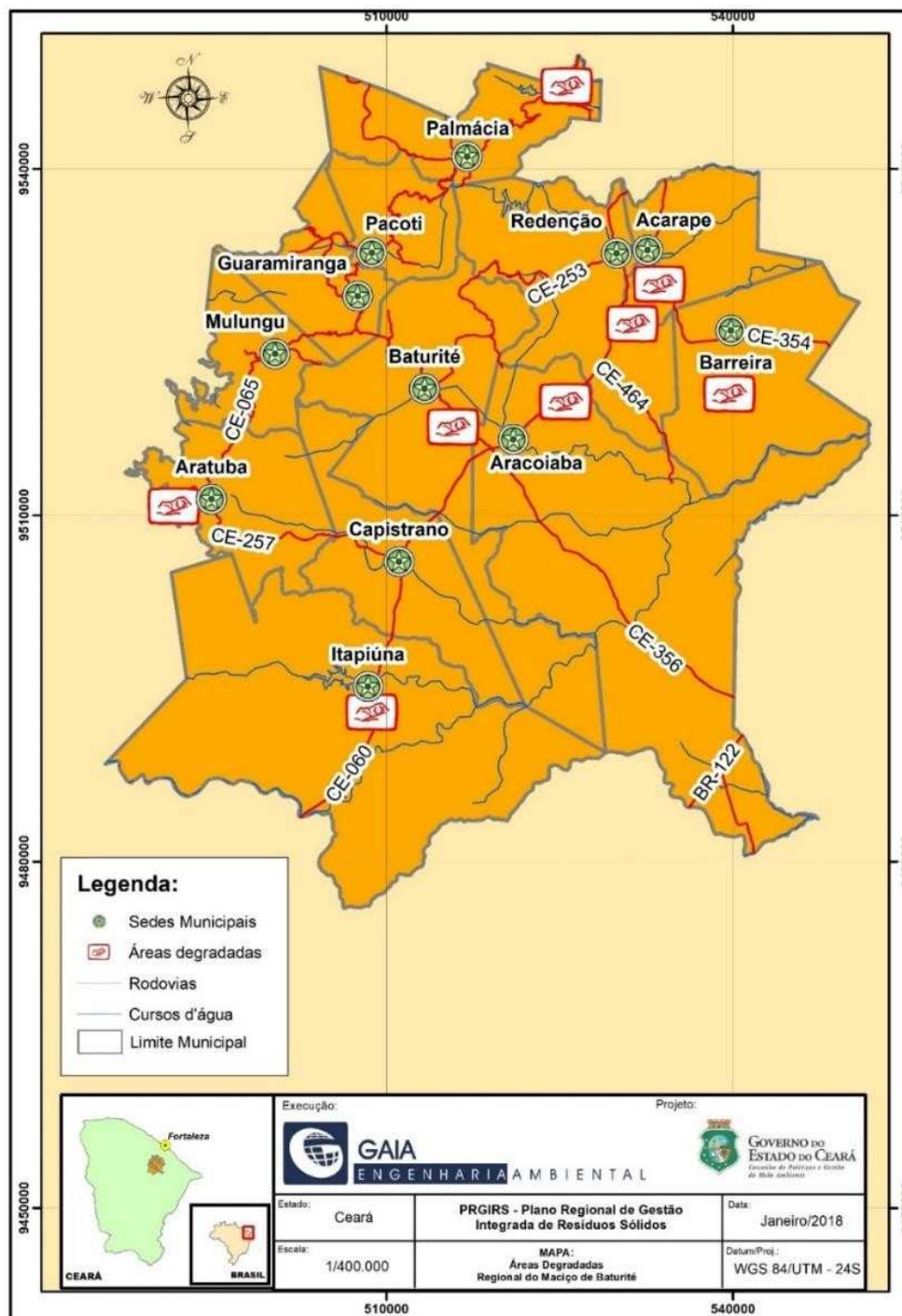
Segundo Nunes, 2016, 60% dos catadores que pertencem a uma associação não possuem Equipamentos de Proteção Individual dos catadores e que dentre estes 50% já sofreram algum tipo de acidente de trabalho. No lixão de Baturité durante a pesquisa de campo realizada foi possível identificar 11 famílias com moradias fixas vivendo em condições desumanas. No tocante a comercialização desses materiais, os catadores foram identificados como indivíduos que possuem escolaridade baixa e este fator interfere diretamente nas vendas do material reciclável para os compradores.

- **Disposição final**

Atualmente todos os municípios fazem o uso de lixões como local de disposição final de seus resíduos sólidos e que segundo a SEMA no ano de 2017 foram contabilizadas 19 áreas degradadas devido à ausência de tecnologia para o tratamento adequado dos resíduos, gerando diversos impactos ambientais irreparáveis dentro da APA, principalmente no tocante as emissões dos gases de efeito estufa

Os municípios de Pacoti, Guaramiranga e Mulungu dispõem de seus resíduos no lixão de Baturité através de um contrato que no ano de 2016 variava entre R\$ 1.600,00 a R\$ 2.500,00 por mês (NUNES,2016). A figura 05 ilustra a localização georreferenciada dessas áreas.

Figura 05 - Localização das Áreas degradadas da Região do Maciço de Baturité



Fonte: PGIRS, 2018

O diagnóstico da área em estudo apresentado no PGIRS retratou a situação atual sem intervenções efetivas na gestão e gerenciamento de resíduos, coleta indiferenciada e

ineficiente, ausência de organização ou associações de catadores, disposição final realizada em lixões com queima de resíduos a céu aberto e nenhum tipo de tratamento e reaproveitamento dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

2.2. Modelo Tecnológico e Rota Tecnológica

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2011 o modelo tecnológico é uma ferramenta importante para a tomada de decisão do gestor que visa atender as prioridades estabelecidas pelo Art. 9º da PNRS, tais como: não geração, a redução, destinação final e disposição final. Nesse conjunto, deve-se constituir o bem econômico e o valor social, através da triagem e reciclagem dos resíduos, com disposição final apenas dos rejeitos, de forma ambientalmente adequada A Política Estadual de Resíduos Sólidos, instituída pela lei 16.032/2016 em seu art. 3º, define rota tecnológica da seguinte forma:

Conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos desde a sua geração até o seu destino final, que envolve os circuitos de coleta de resíduos indiferenciados (todo o tipo de resíduos) e resíduos diferenciados (incluindo coletas seletivas), contemplando o fluxo de tecnologias de tratamento dos resíduos com ou sem valorização energética (CEARA, 2016)

Os municípios brasileiros ainda possuem dificuldades de implantação de tecnologias de destinação e disposição final adequada, e segundo BNDES (2014) as tecnologias com maior aceitabilidade são compostagem¹, reciclagem² e aterros sanitários devido baixo custo quando comparado a outras tecnologias e a disponibilidade de área. (SOARES et.al.2017).

A reciclagem inicia-se na geração de resíduos com a segregação na fonte geradora, exigindo uma educação ambiental junto aos munícipes, sendo a coleta seletiva a segunda etapa desse processo. Já na terceira fase, é realizada a triagem e prensagem, geralmente em associações de catadores, sucateiros, etc. A quarta etapa, beneficiamento, é realizada por cooperativas ou empresas, por último, o material é enviado para as empresas de reciclagem (PAVAN, 2010).

Na compostagem os húmus, produto final da decomposição da matéria orgânica, é utilizado na recuperação de solos degradados, principalmente na agricultura familiar (KHAUSE

.1 É um processo natural de decomposição da Matéria Orgânica (MO) na presença de oxigênio que condições adequadas de temperatura e umidade, a atuação dos microrganismos libera calor, gás carbônico, água e nutrientes como N, P, K, Ca e Mg que se transformam em minerais, ou seja, resulta em um produto estável e rico em matéria orgânica (AQUINO et al., 2005; SIQUEIRA e ABREU, 2016)

² O processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa”(PNRS,2010)

e ROTTER, 2018). Contudo, apresenta desvantagens, por exemplo, a qualidade do produto final depende, basicamente, da coleta e segregação diferenciada do resíduo inicial (BERTON e NOGUEIRA, 2010). Esses sistemas podem ser implantados em grande escala, como nos municípios, ou em pequena escala: nas residências, em indústrias de baixo porte, escolas, comunidades, etc. (VIC H et al., 2017).

Desta forma, as diversas tecnologias existentes para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, possuem, custos de implantação e operação diferenciados. Portanto, devem-se considerar suas especificidades socioeconômicas e ambientais para a escolha de um determinado modelo, a partir do qual, será definida a rota tecnológica (LIMA, 2012). O autor ainda frisa que a região pode adotar os consórcios públicos para o conjunto de municípios de forma a se obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema a ser definido e implantado.

Lima (2012) apresenta os modelos tecnológicos para as regiões do país. Para o nordeste o autor sugere os seguintes arranjos:

1. Reciclagem + aterro sanitário com geração de energia– para municípios com mais de 250.000 habitantes;
2. Reciclagem + compostagem + aterro sanitário – para municípios de porte intermediário e pequeno porte;
3. Reciclagem +aterro sanitário – para municípios de médio e pequenos porte;
4. Reciclagem + Incineração com geração de energia + aterro sanitário – para municípios de grande e médio porte.

Essas tecnologias, devem visar o aproveitamento dos materiais, a geração de energia, diminuição dos custos, o atendimento da legislação, entre outros. Para Pavan (2010) o equacionamento e a solução para os resíduos sólidos iniciam na geração e segue até a disposição final, estando todos intrinsecamente ligados, população, condições econômicas e meio ambiente.

A maioria dos municípios que compõem o Estado do Ceará são municípios de pequeno e de acordo com a pesquisa técnica elaborada pelo BNDES, (2014) a rota tecnológica adequada para esses municípios é composta de coleta domiciliar de resíduos não recicláveis, coleta de resíduos recicláveis secos, coleta de resíduos orgânicos de grandes geradores transporte e disposição dos rejeitos em aterros de pequeno e médio porte de rejeitos.

2.3. Modelo Tecnológico Proposto para Gestão de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará

O modelo tecnológico proposto para o Estado do Ceará foi baseado no Plano de Coletas Seletivas Múltiplas elaborado pela empresa I&T que consiste na instalação de Centrais Municipais de Resíduos – CMR (Figura 06) e Ecopontos para destinação final dos resíduos e a construção de aterros para os rejeitos, conforme orientado pela PNRS (PRGIRS,2018).

Figura 06 – Layout esquemático do CMR



Fonte: Ceará, 2017

A CMR é uma infraestrutura de múltiplos usos que tem por objetivo valorar os resíduos sólidos municipais com acumulação ou triagem dos resíduos secos, conforme o porte do município, a compostagem dos resíduos orgânicos, o desmonte de resíduos volumosos; o picotamento das madeiras da construção civil, de podas e madeiras dos volumosos; a segregação de troncos e galhos grossos; acondicionando os resíduos da capina e roçada em pilhas estáticas para deterioração. Para os municípios de médio e grande porte além das CMR também será instalada Ecopontos que consistem em instalações menores e mais simplificadas para o armazenamento temporário dos resíduos da construção civil, resíduos verdes e resíduos volumosos e resíduos da logística reversa.

A tecnologia proposta para disposição final consiste em aterros sanitários de pequeno e grande porte que devem ser projetados de acordo com as normas vigentes. O prazo estabelecido para a implantação desse modelo tecnológico é de até 60 meses para implantação da coletas seletivas múltiplas e até 22 meses para construção dos aterros sanitários (PRGIRS, 2018).

Esse modelo também propõe a retirada dos indivíduos que realizam a catação de materiais recicláveis de dentro dos lixões ativos para trabalhar em condições melhores dentro

das CMR's. Desta forma os pilares que compõem o modelo tecnológico do Estado do Ceará estão apresentados na figura 07.

Figura 07 – Pilares do Modelo Tecnológico Proposto para o Estado do Ceará.



Fonte: autor, 2018

Atualmente já existem 08 consórcios estruturados e formalizados por intermédio de protocolos de intenções assinados pelos gestores municipais, Termos de Acordos de Conduta (TAC) junto ao Ministério Público Estadual e ainda programas e projetos já elaborados nas seguintes Regiões do Estado: Região Metropolitana- B, Litoral Leste, Litoral Norte, Sertão Centro Sul, Sertão de Crateús. Médio Jaguaribe e Sertão Norte. Ressalta-se que de acordo com SEMA até o ano de 2020 todas as 14 regiões do Estado deverão estabelecer consórcios para melhor Gestão de Resíduos Sólidos intermunicipais.

Dentre os consórcios existentes dois se diferem: Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Sobral – CGIRS/RMS e Consórcio de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Vale Jaguaribe – CGIRS/UVJ. (SCIDADES, 2018).

Segundo a Secretária da Cidades, 2018 a estrutura desse Modelo Tecnológico adotado para os referidos consórcios tem diferença em relação ao Plano de Coleta Seletivas Múltiplas, descrita anteriormente, que se refere os seguintes equipamentos:

- **Central de Tratamento de Resíduos (CTR):** unidade para tratamento e destinação final de resíduos oriundos dos municípios consorciados, contemplando: aterro sanitário para disposição de rejeitos; unidade de tratamento de resíduos de serviço de saúde (RSS), através de

autoclavagem; unidade de tratamento de resíduos da construção civil (RCC), através de trituração; unidade de compostagem de resíduos orgânicos.

- **Estação de Transbordo de Resíduos (ETR):** unidades de recebimento e armazenamento temporário de resíduos provenientes da coleta regular de municípios distantes mais de 25 km da CTR.
- **Central Municipal de Reciclagem (CMR):** Apesar de possuir o mesmo nome da CMR prevista no PCSM, elas se diferem em sua estrutura física e nos tipos de resíduos a serem acolhidos, esta unidade receberá apenas os resíduos com potencial de reciclagem e/ou reutilização secos e já segregados na fonte, ou seja, nos domicílios, realizando o pré-beneficiamento e a comercialização desse material e permitindo que seja disposto no aterro sanitário apenas rejeitos.

De acordo com o PGIRS, 2018, esse sistema de gestão integrada de resíduos será custeado através de diferentes fontes de recursos tais como:

- Os custos iniciais de planejamento, elaboração de projetos e licenciamento ambiental são de responsabilidade da Secretaria das Cidades do Governo do Estado do Ceará, com recursos advindos da própria Secretaria e também da FUNASA;
- Os recursos para a implantação do projeto foram captados pela Secretaria das Cidades através de contrato de empréstimo com o Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID;
- Os custos de operação da CTR e das ETR's serão rateados entre os municípios consorciados de acordo com a quantidade de resíduos que é destinado a CTR por cada membro. O valor da tonelada será calculado a partir dos custos de operação e manutenção da CTR e ETRs;
- Para as CMR's, o IDECI responsabilizou-se pelos projetos, a Secretaria das Cidades pela implantação da estrutura e dos equipamentos e levantamentos de campo para os projetos e as prefeituras pela oferta de terrenos e futura manutenção.

Cabe ressaltar que estes modelos tecnológicos são os melhores em termos construtivos, e que de acordo o Secretaria da Cidades do estado do Ceará em ambos os consórcios a previsão de implantação e operação é até o final de 2019, onde os consórcios estarão licitando empresas privadas para a administração e operação da CTR e os próprios municípios juntamente com o consórcio irão administrar as CMR's e as ETR's (SCIDADES,2018).

Uma outra cidade em destaque no avanço de um modelo tecnológico ideal para gestão de resíduos é a cidade de Fortaleza inserida na RMF-A que optou por implantação individual. Atualmente o município possui 81 Ecopontos distribuídos em diversos bairros da cidade

A usina GNR Fortaleza, localizada em Caucaia-Ceará foi projetada para purificar até 100mil m³ de biometano por dia, cerca de 3,5 milhões de m³ por ano, equivalente a 610.000 toneladas de CO₂ por ano que deixam de ser lançado na atmosfera. Atualmente, é considerada a maior planta de purificação de Biogás do Brasil e é responsável por captar o biogás do Aterro Sanitário Oeste de Caucaia - ASMOC.

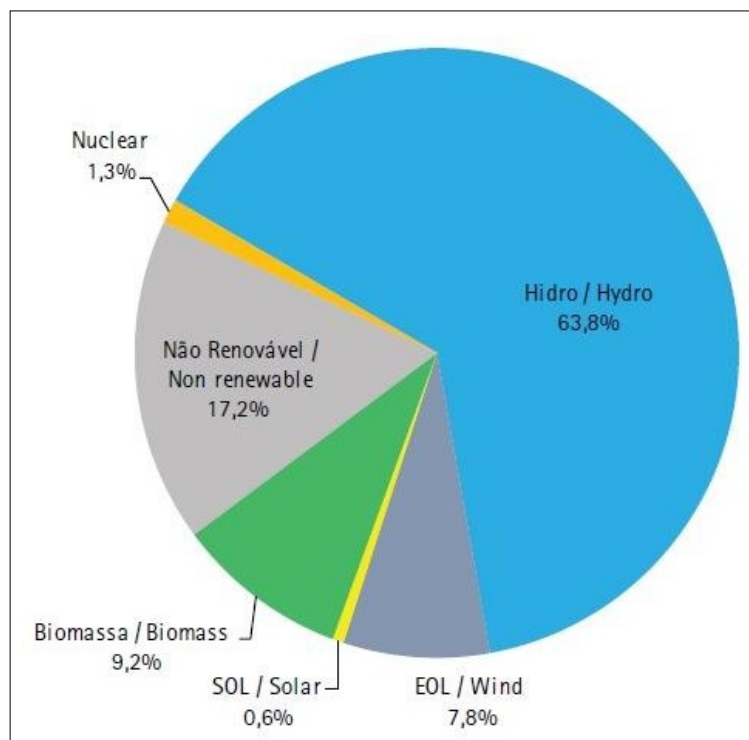
2.4. Panorama Energético no Brasil e no Ceará

De acordo com Rodrigues (2005), a “energia elétrica é uma forma secundária obtida a partir de diferentes fontes de energia primárias, capaz de entregar aos usuários finais energia através de extensas redes de distribuição” Atualmente, existem diversas fontes de energia primária, mas até pouco tempo, a geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis predominava.

No atual cenário, em que o meio ambiente se tornou um dos tripés da sustentabilidade mundial, diversas são as fontes de energias primárias e cada vez mais esse mercado tem se estabilizado. No Brasil, essa perspectiva não é diferente, basta observar a hodierna matriz energética.

Segundo Ministério de Minas e Energia – MME (2018), a produção de eletricidade no Brasil é, predominantemente, de origem renovável, sendo basicamente proveniente de usinas hidrelétricas que foram responsáveis por 65,2% da oferta interna, em 2017. Outras fontes de energia renováveis como, eólica, solar e biomassa, correspondem respectivamente, a 7,8%, 0,6% e 9,2%. A energia nuclear é responsável por 1,3% e energias não renováveis representa 17,2%, como pode ser visto na figura 08 (MME, 2018).

Figura 08 – Percentual das fontes de energia em 2017 no Brasil



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2018).

A energia gerada a partir de resíduos sólidos urbanos, está incluída dentro do setor biomassa (9,2%) representando cerca de 0,07% sobre este total. (DHYANI ET AL, 2018).

Com base no documento: Panorama da produção de energia elétrica no Estado do Ceará a capacidade de energia instalada total no estado é de 4.115.735 Kw. Desses, 1.263 Kw são de origem hidrelétricas, 2.153.158 Kw de termoeletricas, 5.000 Kw energia solar e 1.956.264 Kw eólica. O documento elabora pelo IPECE ainda relata que o Ceará não conta com nenhuma usina de produção térmica proveniente de biomassa, seguindo na direção contrária à tendência brasileira que é de expansão no setor. (IPECE,2018).

A produção de energia elétrica consiste em um importante insumo para o crescimento socioeconômico de qualquer país, e por isso é necessário que haja um abastecimento por meio de fontes adequadas, perenes e confiáveis.

Historicamente, o desenvolvimento das atividades econômicas em todo o mundo foi pautado na utilização de combustíveis fósseis, responsáveis por grande parte dos problemas ambientais encontrados na atualidade, sobretudo, os relativos ao aquecimento global. Segundo o relatório REN21 – Renewables Global Status Report (2017) a produção dessas energias ainda representa mais de 75% do consumo mundial, porém já se registram uma significativa adição

de energias renováveis instaladas no cenário mundial, visando combater o aumento das emissões de GEE. (RIBEIRO, 2000).

Aos esforços para entender e frear as mudanças climáticas estão os projetos de energia a partir de fontes renováveis que contribuem para não emissão dos GEE, isso porque ao desenvolver esses projetos os países se tornam menos dependentes de fontes não renováveis, como petróleo e carvão. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL é um desses mecanismos que além de ajudar os países desenvolvidos a reduzir suas emissões de GEE ao comprarem créditos de carbono de países em desenvolvimento, tal mecanismo também tem na sua função contribuir para a sustentabilidade ambiental do país hospedeiro, através da obtenção de tecnologias mais limpas (COSTA, 2006).

Segundo Lopes (2002), a matriz de energia elétrica escolhida deve apresentar o melhor retorno financeiro e econômico possível, mas também deve-se considerar os aspectos sociais e ambientais, ponderando os impactos e analisando a viabilidade técnica e operacional.

Neste contexto para que se possa apontar a necessidade da geração de energia a partir dos resíduos sólidos, primeiramente serão apresentados dados e informações sobre a oferta, a demanda e a matriz de geração no setor de energia elétrica no Brasil e no Estado do Ceará através do Banco de Informação de Geração de Energia, Panorama Energético do Estado do Ceará e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

2.5. Geração de Energia através de Resíduos Sólidos Urbano

Entre as matérias primas temos os resíduos sólidos que funcionam como fonte de energia visto que, possuem potencial na produção de gases que são convertidos em eletricidades. Entretanto, projetos a partir de biomassa e resíduos são ainda baixos, apenas 0,2% advém de da referida fonte, na década de 80, em 2014 esse percentual subiu para 2,1% (EPE, 2017). Ainda segundo o mesmo autor, no Brasil a geração de energia elétrica através de biomassa foi de 8,5% em 2016. Mas existem pequenos sistemas isolados que não são monitorados. Do mesmo modo, existem sistemas reduzidos que possuem potencial, contudo não existem dados, estrutura e desejo político para o investimento.

Segundo Di Matteo et al. (2017) faltam informações sobre a geração de biogás em pequenos sistemas, por exemplo, em cidades com população reduzida. Os autores almejam identificar o ganho energético alcançáveis a partir de resíduos sólidos para a geração de biogás em pequena escala e usar plantas para aumentar o nível de sustentabilidade dos sistemas de energia urbana.

Segundo Venkateswara Rao et al. (2010), sistemas de digestão anaeróbica de RSU requer menos investimento de capital e custo unitário de produção em comparação com outras fontes de energia renovável, por exemplo, a hídrica, solar e eólica. Além disso, o autor frisa que a energia renovável a partir da biomassa está disponível como um recurso doméstico nas áreas rurais. Em seu estudo o autor supracitado diz que a capacidade total instalada de geração de bioenergia (biomassa de resíduos sólidos) na Índia até 2007 foi de cerca de 1.227 MW.

Ogunjuyigbe et al, (2017) identificaram o perfil dos resíduos sólidos de algumas cidades da Nigéria usando dados populacionais e per capita, a partir do estudo constataram que a produção de energia através digestores anaeróbios na Nigéria é a tecnologia com melhor viabilidade econômica para a maioria das cidades, seguida pelos aterros.

2.5.1. Biogás

O Biogás é um gás de grande relevância para o meio ambiente devido a sua origem renovável tendo a capacidade de transformar resíduos sólidos urbanos em recursos valorizável, contribuindo na preservação dos recursos energéticos não renováveis.

A produção de biogás pode ocorrer naturalmente ou artificialmente, dentro de condições ideais por intermédio de bactérias específicas presentes nos materiais orgânicos biodegradáveis (PEREIRA,2014). Cabe ressaltar que este gás quando emitido de forma desordenada pode contribuir para a formação do efeito estufa, risco de explosões, odores e impactos negativos a saúde humana e ambiental (ENSINAS, 2003).

No tocante a composição química do biogás, pode variar de acordo com a decomposição da matéria dos resíduos, porém, os seus constituintes principais são: Metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2). (JUNIOR,2005). O quadro 01 apresenta as principais composições e características existentes nesse gás que podem influenciar no seu potencial de geração.

Quadro 01 - Composição dos principais constituintes do biogás

Gás	Composição típica	Massa específ. (kg/m³)	Limite de explosividade	Solub. em água (g/l)	Propriedades gerais
CH ₄	45-60%	0,717	5-15%	0,0645	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
CO ₂	35-50%	1,977	----	1,688	inodoro, incolor, asfixiante
N ₂	0-10%	1,250	----	0,019	inodoro e incolor
O ₂	0-4%	1,429	----	0,043	inodoro e incolor
CO	<0,1%	1,250	12,5-74%	0,028	inodoro, incolor, tóxico, inflamável
H ₂	<0,1%*	0,090	4-74%	0.001	inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
H ₂ S	<0,07%	1,539	4,3-45,5%	3,846	incolor, muito tóxico

Fonte: Júnior,2005

Segundo ZAGO (2003), o biogás apresenta poder calorífico de acordo com a quantidade de metano, atingindo de 5000 a 6000 Kcal/m³, podendo chegar a 12.000 kcal/m³ a partir da retirada de gás carbônico. Pode-se verificar através do quadro 02 a quantidade de biogás equivalente a outros combustíveis.

Quadro 02 - Quantidade de Biogás equivalente a outros combustíveis

Biogás (m³)	Combustíveis
1,58 a 2,2	1 litro de gasolina
1,55 a 2,18	1 litro de diesel
1,48 a 2,08	1 litro de óleo de combustível
0,91 a 1,28	1 litro de álcool carburante
0,46 a 0,65	1 kg de lenha com 10% de umidade

Fonte: Cavalcante,2016

No Brasil, Santos et al. (2018) realizaram estudo para avaliar o potencial de produção potencial de biogás a partir de múltiplos resíduos orgânicos, e identificaram que a potência para 2015 estava entre 4,5 e 6,9 GW, além de uma redução de quase 5% de emissões de CO₂ ao ano. Os autores ainda relatam que mais de 180.000 ônibus poderiam ser alimentados com o biogás gerado no país. Por outro lado, existem limitações como: viabilidade econômica, ausência de políticas de incentivo e o fraco desenvolvimento de modelos de negócios impedindo o avanço de projetos.

2.6. Tecnologias de Tratamento de Resíduos com Geração de Energia.

Segundo vários autores da área - como Themelis et al. (2013) e Rentizelas et al. (2014) - os sistemas de tratamento de RSU com geração de energia são tecnologias, que usam métodos térmicos, mecânicos e biológicos que geram benefícios de recuperação da energia armazenada nos resíduos, redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), diminuição do volume dos resíduos e, conseqüentemente, redução da utilização de espaço para sua disposição final.

Os custos, a eficiência energética, a redução das emissões de GEE e a redução de volume e massa dos RSU variam bastante com a tecnologia utilizada. A seguir são detalhadas algumas tecnologias existentes.

2.6.1. Incineração

A técnica de incineração é uma das metodologias mais antigas, utilizada em vários países pelo mundo. Na contemporaneidade, surge como processo térmico voltado para o tratamento de RS (BNDES, 2014). Em concordância, Rotter (2018), relata que a incineração é utilizada mesmo antes dos aterros, para reduzir o volume e às vezes, também, para a produção de energia. A NBR 11.175/1990 define o processo como “qualquer dispositivo, aparato, equipamento ou estrutura usada para a oxidação à alta temperatura que destrói ou reduz o volume ou recupera materiais ou substâncias”.

O método de incineração de RSU pode produzir diversas substâncias tóxicas que são emitidas na atmosfera, como dioxinas, gases de mercúrio e furanos (FOSTER et al, 2016). No entanto, nos dias atuais, o processo possui sistemas de tratamento e depuração de gases, responsáveis por controlar, significativamente, a emissão de poluentes atmosféricos, e satisfazer, em geral, aos padrões ambientais de emissão vigentes (MACHADO, 2015). Leite (2016) diz que esse método, não é uma solução sustentável, já que não contribui para a mudança dos padrões de consumo da sociedade.

Segundo Galvão et al. (2002) as usinas de incineração obtêm energia a partir da queima dos resíduos, desde que esses sejam combustíveis e não excessivamente úmidos. O autor ainda relata que o calor gerado pode ser utilizado para aquecimento direto, em processo de vaporização ou para gerar eletricidade. Em um processo normal, a incineração de resíduos urbanos, tem limite de 30 toneladas métricas por hora, com capacidade mínima para operação de 10 a 20 métricas por hora (HAUSER e LEMME, 2007). De acordo com Tolmasquim (2003) são gerados em média 769 kWh/t de energia elétrica por tonelada de resíduos.

2.6.2. *Pirolise*

O processo de decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio é definido como pirólise. De acordo com Campuzano et al. (2019), a pirólise é um dos processos termoquímicos mais eficientes e ambientalmente atraentes para conversão de biomassa e resíduos em produtos energéticos.

No tratamento de resíduos sólidos essa técnica possui importante papel. Uma das vantagens é que muitos tipos de matérias-primas podem ser utilizados, incluindo resíduos industriais (CZAJCZYŃSKA, et al., 2017).

No processo ocorre o aquecimento da biomassa em meio inerte resultando na produção de vapor orgânico composto de fragmentos de celulose, hemicelulose e polímeros de lignina encontrados na biomassa. Esses vapores podem ser condensados gerando um líquido orgânico de fluxo livre, vulgarmente conhecido como bio-óleo (DHYANI; BHASKAR, 2018).

Diferentes tipos de pirólise foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos, são elas: rápido, catalítico, intermediário, lento e a vácuo (CZAJCZYŃSKA, et al., 2017). Para Mota et al. (2015) o reator pirolítico é o equipamento mais importante para que a pirólise se desenvolva com boa eficiência. Segundo ele, vários tipos de reatores foram planejados, no entanto, os principais são os de leito fluidizados (borbulhante e circulante), e também estão disponíveis os de leito fixo, leito de jorro, cilindro rotativo, reator ciclônico, cone rotativo dentre outros (MOTA et al., 2015).

2.6.3. *Aterros Sanitários*

Em comparação a países desenvolvidos, o Brasil ainda utiliza tecnologias retrógradas, por exemplo, os aterros sanitários. Segundo Gomes et al., (2012), o país opta por esse procedimento para tentar erradicar a utilização de lixões. O autor ainda frisa que o principal aspecto negativo é que, mesmo com os sistemas de coleta e queima do biogás gerado, parte do gás gerado não é captado pelo sistema, sendo, portanto, lançado na atmosfera.

Na mesma linha de raciocínio, Henriques (2004) frisa que o aterro sanitário não se configura como uma estratégia coerente com as preocupações ambientais hodiernas, e que sua utilização como alternativa energética deve-se ao fato deste ser uma fonte de metano, por consequência possuir um grande potencial energético.

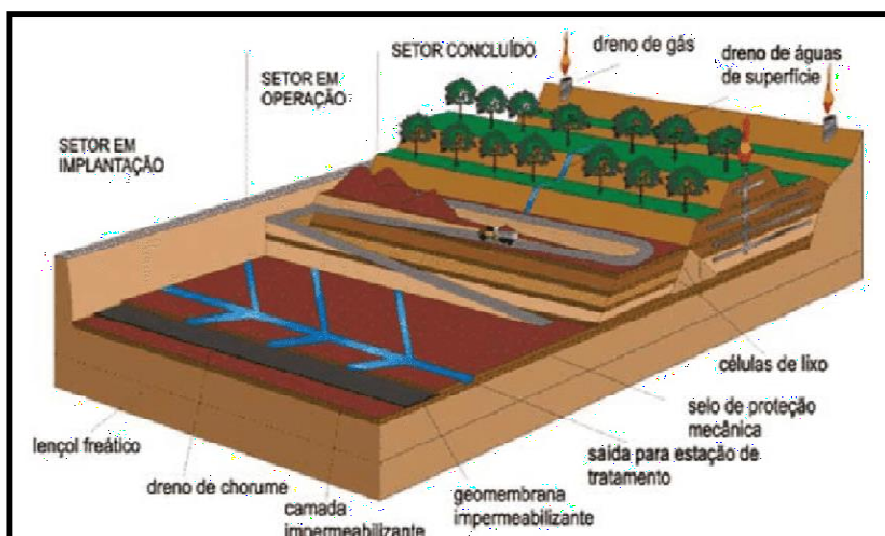
Por outro lado, Lima (2012) diz que o aterro sanitário pode ser uma opção correta sob vários aspectos: ambientais, sanitário e social para destinação de RSU. Segundo Mohammad et al. (2018) um aterro é uma grande área de terra ou um local escavado que é

especificamente projetado e construído para receber resíduos. Isso condiz com o estabelecido na legislação, precisamente, a NBR 8.419 de 1992 que normaliza os projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, na qual define aterro como:

"técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou risco à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ao meio ambiente; método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho".

Sendo assim, a construção de uma estrutura desse porte, requer diversos elementos e processos de engenharia, por exemplo, o planejamento e projeção de sistema de impermeabilização de base, sistema de drenagem de águas superficiais, drenagem de líquidos e gases gerados na decomposição da massa de resíduos, sistema de cobertura dos resíduos, unidades de tratamento de lixiviados e outros (BERTICELLI et al., 2016). Na figura 09 é apresentado o esquema de um aterro sanitário.

Figura 09 - Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: IPT, 2000.

2.6.4. Digestão anaeróbia

Há uma tendência mundial na geração de energia renovável, visto que, energias de fontes fósseis são finitas, além de serem grandes poluidores ambientais. De acordo com Leite et al. (2009) o tratamento anaeróbio de RSU é uma alternativa promissora para os resíduos orgânicos, devido sua alta produção de biogás. Os autores ainda frisam que os processos anaeróbios para o tratamento de RS ainda não é uma prática corriqueira, devido à falta de configurações de sistemas de tratamento e, sobretudo, quando se avalia o tempo necessário para bioestabilizar os resíduos, que é bastante longo, em relação aos processos aeróbios

A Digestão Anaeróbia (DA) é uma tecnologia cada vez mais usada para tratar simultaneamente resíduos sólidos orgânicos e líquidos, para equilibrar o conteúdo de nutrientes, reduzir os efeitos negativos dos compostos tóxicos no processo, além de aumentar o rendimento do biogás (CARLINI ET AL., 2017). A DA constitui-se como um processo biológico em que diversos microrganismos decompõem materiais orgânicos biodegradáveis na ausência de oxigênio molecular livre (DANTAS et al., 2016). Durante o processo são gerados vários produtos, como: metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, bem como células bacterianas (CHERNICHARO, 1997). O processo de digestão é dividido em quatro fases, são elas:

- **Hidrólise e Acidogênese**

A primeira consiste na conversão do material orgânico particulado em compostos dissolvidos mais simples, que podem atravessar as paredes celulares das bactérias (BARCELOS, 2009). Essa conversão ocorre devido à ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (CHERNICHARO, 1997). No processo seguinte, acidogênese, os produtos gerados na hidrólise, são absorvidos pelos microrganismos acidogênicos e excretam substâncias orgânicas e ácidos graxo voláteis (AGV) (SILVA, 2009). Nessa fase, a maioria das bactérias são anaeróbias, conforme figura 10.

- **Acetogênese**

Na acetogênese os compostos da acidogênese são transformados em ácido etanóico, hidrogênio e gás carbônico por bactérias sintróficas acetogênicas. “Essa é uma das fases mais delicadas do processo, considerando que é necessário manter o equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerado seja consumida pelas bactérias Arqueas responsáveis pela metanogênese” (ARAÚJO, 2017). As reações acetogênicas só ocorrerão se a concentração de hidrogênio e acetato estiverem em baixa concentração.

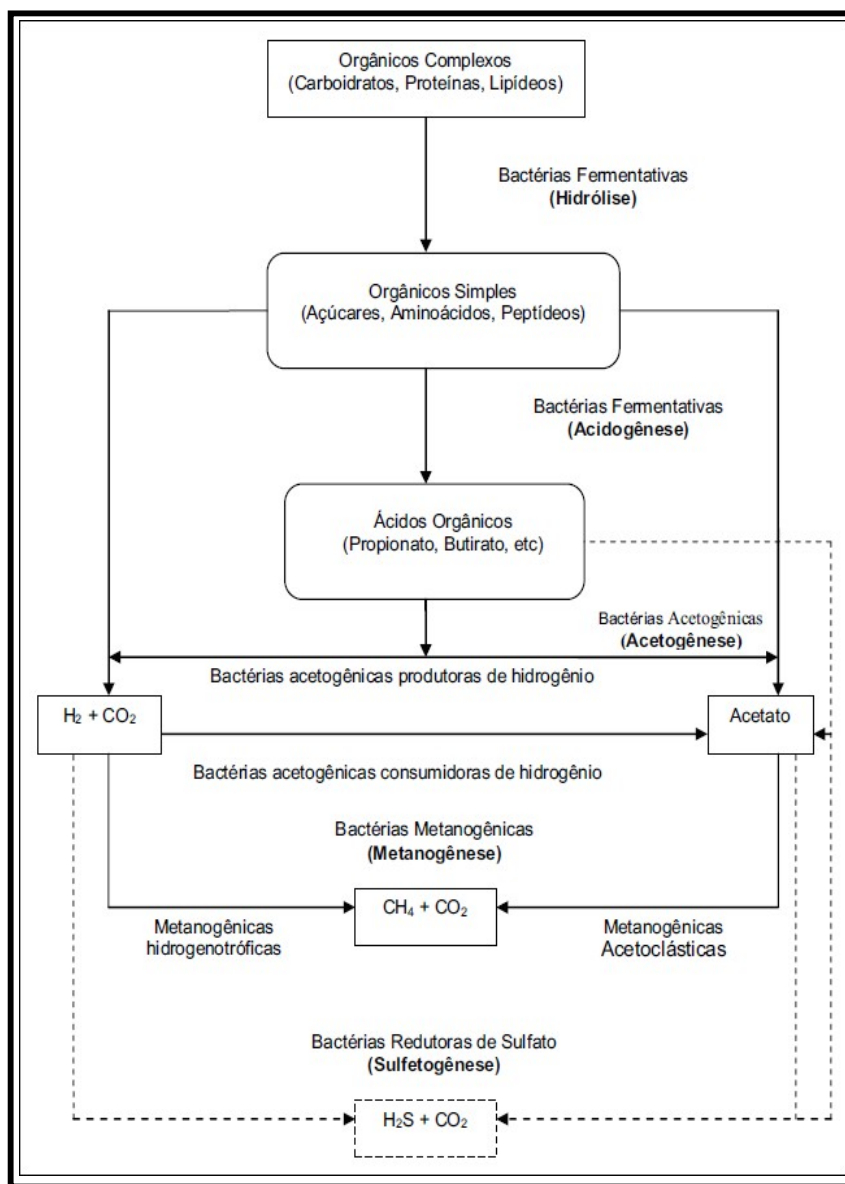
- **Metanogênese**

A metanogênese é a etapa final do processo. Nessa fase, o domínio Archaea é de fundamental importância, já que os organismos metanogênicos realizarão a mineralização da matéria orgânica, bem como produção de metano (DANTAS et al., 2016). Os equipamentos biodigestores não são responsáveis pela produção do biogás, mas fornecem condições para que um grupo de bactérias metanogênicas, em condições ideais, o faça (GRANZOTTO, et al., 2016).

O biogás gerado pode ser usado de forma direta, situação na qual oferece poder calorífico entre 19 e 25 MJ/Nm³, ou tratado para separação e aproveitamento do metano, cujo

poder calorífico é semelhante ao do gás natural (SOARES et al., 2017). Os autores frisam que quando convertido para energia elétrica, é possível obter entre 50 e 150 kWh por tonelada de RSU, dependendo das características do resíduo. Segundo Malinowsky (2016), existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás.

Figura 10 - Processos da digestão anaeróbia.



Fonte - Chernicharo, 1997 apoud Lettinga et al. 1996.

- **Biodigestores**

O biodigestor é uma alternativa tecnológica para o gerenciamento dos dejetos, através da sua estabilização pela ação de microrganismos anaeróbios. Além de produzir gás, o qual pode ser convertido em energia elétrica, o biodigestor produz ainda, biofertilizante. Diminuindo, além disso, potencialmente a poluição do meio ambiente, o mau cheiro, moscas e parasitas (FRIGO et al., 2015).

O biodigestor constitui-se de uma câmara fechada na qual se coloca o material orgânico, em solução aquosa para sofrer decomposição (digestão anaeróbica), produzindo o biogás. Há uma vasta quantidade de modelos de biodigestores; no caso, cada qual adaptado a uma realidade e uma necessidade de biogás e.g. quanto ao teor de sólidos, forma de alimentação, número de estágios e quantidade de resíduo orgânico tratado (SALES FILHO, 2014; DEGANUTTI et al, 2002).

Com relação ao teor de sólidos, conforme Mata-Alvarez (2003), os biodigestores são classificados como de baixo teor de sólidos (10 a 15% Sólidos Totais - ST) e de alto teor de sólidos (20 a 40% - ST).

Consoante sua forma de alimentação, os biodigestores são comumente classificados como de alimentação contínua e descontínua. Nos sistemas contínuos, a alimentação dos resíduos orgânicos é inserida no sistema de forma contínua na mesma proporção que o resíduo digerido é removido; o resultado é uma produção contínua de biogás (RODRIGUES, 2005). Quanto aos descontínuos, o abastecimento de resíduos é introduzido com ou sem a adição de inóculo. Após o período digestivo, os resíduos são descartados e o processo é reiniciado (VANDEVIVERE, et al. 2002).

Em relação ao número de estágios, o tratamento de resíduo sólido orgânico pode ter um, dois ou de mais estágios (multi-estágios). Nesses sistemas, as reações de hidrólise, acidificação, acetogênese e metanogênese são realizadas de forma sequencial, em diferentes digestores. Por sua vez, os sistemas com um único estágio, as reações anteriormente aludidas se processam simultaneamente no mesmo digestor (DE BAERE, 2003).

Entre os modelos de biodigestores de pequeno porte mais utilizados temos: o Indiano e Chinês. O biodigestor Indiano se caracteriza por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras (DEGANUTTI et al., 2002).

O modelo Chinês é formado por uma câmara cilíndrica feita em alvenaria para a fermentação, com teto abaulado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás (DEGANUTTI et al., 2002).

2.7. Métodos de Estimativa para Valoração Energética.

A partir da tecnologia de Valoração Energética dos resíduos pode-se estimar o potencial elétrico.

Existem vários métodos para estimar a quantidade de metano gerada a partir de resíduos sólidos. Henriques. (2004) alguns métodos apresentam uma aproximação grosseira, com representatividade apenas do gás gerado pelos resíduos sólidos domésticos, bem como métodos robustos que consideram a cinética de geração de biogás. Modelos matemáticos são ferramentas fundamentais para essa estimativa.

A seguir apresenta-se alguns métodos de projeções de potencial energético em Aterros Sanitário, Incineradores e Biodigestores.

2.7.1. *Modelo de estimativa de geração de CH₄ e CO₂ em aterro.*

Segundo Muller (2016), o modelo LandGEM (EPA, 2005), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), é comumente usados em estudos de previsão de produção de gases a partir de RSU. Esta técnica estima a quantidade de gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂) produzido pelos RSU dispostos em aterros, conforme a equação abaixo.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 K L_0 \left(\frac{M_t}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad (1)$$

Na qual:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m³/ano);

i = incremento de tempo de 1 ano;

n = (ano do cálculo) – (ano inicial do cálculo);

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de geração de metano;

Lo = capacidade potencial de geração de metano (m³/Mg);

Mt = massa de resíduos aceita do enésimo ano Mg;

Ti,j = idade da j-ésima seção de massa de resíduo Mi, aceita no enésimo ano (anos em número decimal, p. ex. 3,2 anos).

Ressalta-se que esta ferramenta faz uso de parâmetros baseados nas condições existentes nos Estados Unidos devendo ser observadas e comparadas com as da área de implantação do projeto proposto.

2.7.2. *Modelo de estimativa do Potencial do Biogás em Aterros Sanitários*

Diversos são os métodos para estimar a quantidade de biogás em aterros sanitários. No entanto, os mais conhecidos e indicados são aqueles que consideram a cinética de geração de biogás em função de parâmetros, como por exemplo as condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo CETESB/SMA (2003).

Brito Júnior (2005) realizou estudo sobre gases em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e enfatizou a importância da escolha do método para estimativa do biogás a partir de um levantamento bibliográfico. O autor cita diversos modelos e dentre estes estão o modelo do International Panel on Climate Change - IPCC que segundo o autor é uma metodologia de fácil aplicabilidade pois é realizada com base nos dados de cada região.

Ainda segundo o autor supracitado o IPCC calcula a quantidade de gás baseado na quantidade de carbono orgânico degradável presente em resíduos sólidos, calculando assim a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos.

Segundo o IPCC (1996), o cálculo da emissão de biogás ocorre com base na equação 2. Todavia, se faz necessário estimar o carbono degradável presente no resíduo (HENRRIQUES 2005).

$$Q_{CH_4} = \frac{Pop_{urb} \cdot TaxaRSD \cdot RSDf \cdot L_0}{pCH_4} \quad (2)$$

Em que:

Q_{CH_4} : metano gerado ($m^3 CH_4$ /ano);

Pop_{urb} : população urbana (habitantes);

$TaxaRSD$: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano (kg de RSD/habitante.ano);

$RSDf$: fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%];

L_0 : potencial de geração de metano do lixo (kg de CH_4 /kg de RSD) pCH_4 : massa específica do metano (kg/ m^3).

Para encontrar os valores do potencial de geração de metano no lixo (L_0), também foram desenvolvidas equações pelo IPCC (2000). Com o mesmo objetivo a CETESB (2006), desenvolveu um modelo de geração de biogás. A vazão do metano é calculada com base em uma constante de decaimento, no potencial de geração de biogás, e nos demais parâmetros.

$$\sum Q_x = KL_0 \sum (R_x e^{-k(x-T)}) \quad (3)$$

$$\int \frac{dQ}{dt} = k R_x L_0 \quad (4)$$

$$Q_x = K R_x L_0 e^{-k(x-T)} \quad (5)$$

Em que:

Q_x = vazão de metano ($m^3 CH_4$ /ano);

k = constante de decaimento (1/ano);

L_0 = potencial de geração de biogás (m^3/kg);

R_x = fluxo de resíduos (t/ano);

x = ano atual;

T = ano de deposição do resíduo.

2.7.3. Modelo de estimativa da energia elétrica gerada em Biodigestores

A energia elétrica, gerada a partir da queima do gás metano produzido em biodigestores anaeróbico, pode ser estimada, conforme a equação 06, em função do Poder Calorífico Interno do Metano, 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 taxa de produção de metano ($RB(t)$) - em m^3/s . (MULLER,2016).

$$P_{digest} = \eta_m \times \eta_g \times PCI_{CH_4} \quad (6)$$

2.7.4. Modelo de estimativa da energia elétrica gerada em Incineradores

A energia gerada utilizando incineradores pode ser estimada através da equação 7 que considera a eficiência do ciclo a vapor (η_v), a eficiência do gerador elétrico (η_g), taxa de incineração de RSU ($M_i(t)$) - em Kg/s - e o poder calorífico inferior do RSU da entrada da caldeira (PCI) - em MJ/Kg (MULLER,2016).

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times M_i(t) \times PCI \quad (7)$$

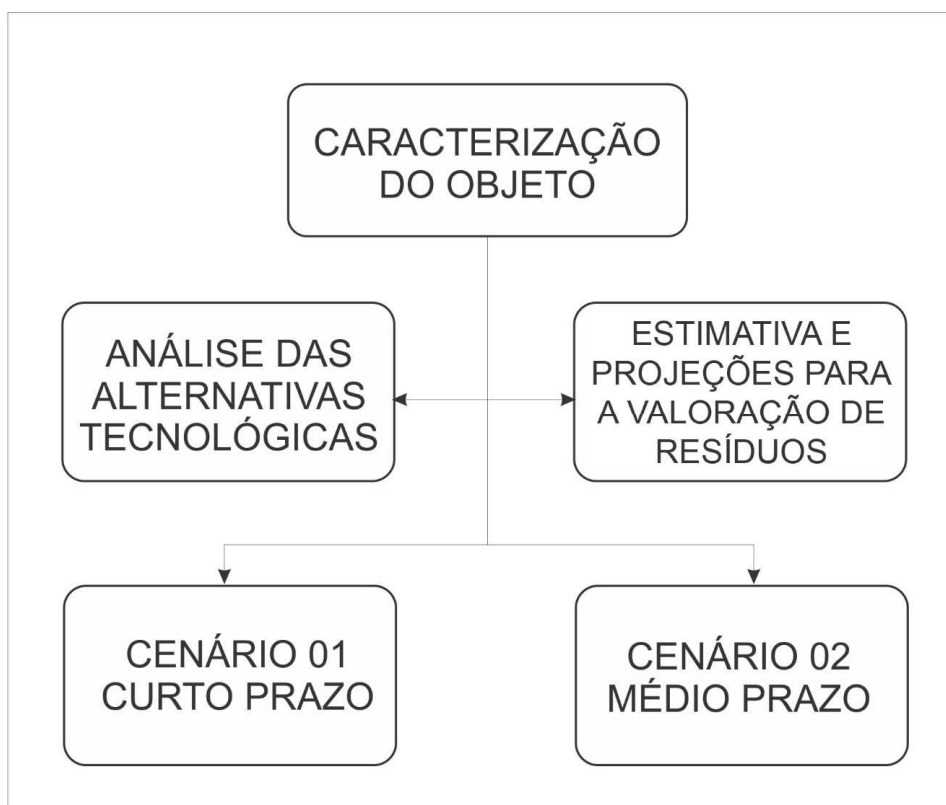
3. METODOLOGIA

De acordo com Muller, 2016 os procedimentos metodológicos são importantes para organização, análise e interpretação dos dados obtidos ao longo da pesquisa. A metodologia definida neste estudo está fundamentada na abordagem quantitativa e será de natureza descritiva que Gil definiu da seguinte forma:

os dados coletados são transformados em números que, após análise, geram conclusões que são generalizadas para todo o universo de pesquisa. Esse tipo de pesquisa possui amplo alcance, permite conhecimento objetivo da realidade e facilidade de sistematizar dados em tabelas, gerando informações a partir de gráficos (GIL, 1991).

Este capítulo apresenta as etapas dos procedimentos metodológicos e os materiais e métodos utilizados para o alcance dos objetivos propostos. O fluxograma ilustrado na Figura 11 apresenta as etapas de caracterização do objeto incluindo os cálculos e projeções da área, em seguida escolheu-se as tecnologias para o tratamento e aproveitamento energético para os resíduos estimados e pôr fim a utilização de métodos para estimativa do potencial energético. A partir desses dados foi possível construir um prognóstico através da construção de 02 Cenários Referencial: Cenário 01 curto prazo (2019- 2024) e Cenário 2 médio prazo 10 anos (2019 - 2028).

Figura 11- Fluxograma das Etapas dos procedimentos Metodológico



Fonte: Autor (2019).

3.1. Caracterização da área em Estudo

A área de estudo deste trabalho foi a Região do Maciço de Baturité definida pela a Regionalização Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos no Estado do Ceará, composta atualmente por 12 municípios: Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Pacoti, Palmácia, Redenção, no qual, se difere da divisão territorial realizada pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), com 13 municípios abrangendo também município de Ocara.

Entretanto, não foi possível realizar a composição gravimétrica em sua totalidade justificado por razões físicas, financeiras e temporais da pesquisa. Para tanto escolheu-se, dois municípios representativos levando em consideração aspectos que influenciam diretamente na geração de resíduos tais como: Populacional, Financeiro, territorial, climático e turístico, sendo Baturité representando os municípios de médio e grande porte na Região e o município Pacoti representando os municípios inseridos na APA e de menor porte. Ressalta-se que a escolha também se deu pela facilidade de acesso as prefeituras municipais que prontamente ajudaram na realização dos trabalhos disponibilizando equipamentos e funcionários.

A coleta de dados e informações para a elaboração de um prognóstico foi através de fontes primárias e secundárias realizada da seguinte forma:

- **Primária:** Visita técnica aos municípios, realização da composição gravimétrica no município de Baturité e Pacoti e participação de audiência pública em conjunto com os gestores municipais dos municípios
- **Secundária:** Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Maciço de Baturité publicado em dezembro de 2018, Plano de Coleta Seletivas Múltiplas da Bacia Metropolitana elaborado em 2017, pesquisas bibliográficas e dados censitários tais como: SEMA, IPECE, SNIS, Scidades.

3.2. Análise de Alternativas de Tecnologias de Geração de Energia a partir do Resíduos

A alternativa tecnológica adotada para o primeiro cenário definido como curto prazo (2019-2024) se dará: Coleta Seletivas Múltiplas e Aterro Sanitário, ou seja, o Modelo Tecnológico aprovado e adotado pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente, juntamente com os gestores municipais da Região conforme apontado no PRGIRS, 2018.

Para o Cenário 02 definido como médio prazo (2028), analisou-se as tecnologias de tratamento para valoração energética apresentada no capítulo anterior e optou-se por uma

tecnologia que mais se adeque ao objeto do estudo, tendo por critérios a qualidade ambiental, viabilidade econômica e benefícios sociais junto à população residente da região.

3.3. Estimativas e Projeções para valoração de resíduos sólidos.

3.3.1. Estimativa Populacional

O quantitativo populacional serve como base para a estimativa de produção de Resíduos Sólidos, visto que a sua produção está diretamente ligada ao número de habitantes dos municípios e seu estilo de vida.

O período temporal adotado para a construção dos cenários futuros foi de 10 anos (2019 a 2028), visando seguir o período estabelecido no Plano Regional de Gestão de Resíduos e metas de implantação das unidades de tratamento.

Para o cálculo das estimativas utilizou-se dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), especificamente as informações censitárias de 2000 e 2010. A partir das informações censitárias, dentre os diversos métodos existentes aplicou-se a técnica de progressão geométrica, visto que foi a que mais se adequou com o comportamento do crescimento observado na Região. Desta forma, a equação abaixo apresenta o método escolhido.

Equação 08: Método Geométrico para Cálculo da População

$$P_t = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_0)} \quad (8)$$

Onde:

P_t = População que se deseja encontrar.

P_0 = População de acordo com o primeiro ano de referência.

K_g = Taxa de crescimento geométrico.

t_0 = Primeiro ano de referência.

t = Ano final de referência.

3.3.2. Estimativa de Resíduos Sólidos Urbanos

Devido à ineficiência da gestão e gerenciamento de resíduos na região em estudo, tornou-se impossível mensurar com exatidão a geração de resíduos e consequentemente o cálculo da Geração Per capita³, e Taxa de Atendimento⁴, diante disto a estimativa de geração

³ É a contribuição de cada indivíduo na geração total de resíduos em um espaço de tempo (Gomes, 1989)

⁴ Percentual do atendimento da coleta de resíduos porta a porta dentro da área a ser analisada

de resíduos sólidos no horizonte de 10 anos utilizou a equação (09) no qual considerou os seguintes dados:

$$RSU = \frac{\text{População urbana} \times \text{Taxa de atendimento} \times \text{Gp RSU médio}}{1.000} \quad (9)$$

Onde:

- a) *RS* é a quantidade estimada de resíduos sólidos em ton.dia;
- b) *POP*: População estimada na fase anterior no horizonte de 10 anos;
- c) *Taxa de atendimento* sabendo que atualmente a taxa de atendimento de coleta nos municípios que compõem a região é de aproximadamente 70% de acordo com o IPECE, 2017, optou-se por considerar a totalidade (100%) como uma previsão otimista para os cenários futuros;
- d) *GP RSU médio* é a geração *per capita* de RSU médio, em kg/hab. dia: optou-se por adotar a GP médio de 1,3 kg/hab. dia calculado e publicado no Plano de Coletas Seletivas Múltiplas elaborado no ano de 2017, onde foi realizado um trabalho *in loco* junto a todos os municípios integrante da área em estudo, sendo possível realizar uma estimativa real de geração, considerada a fonte atualizada para compor este estudo.

3.3.3. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos

Caracterizar os resíduos sólidos urbanos de um município, ou determinar a composição física dos resíduos produzidos por uma população, é uma tarefa difícil, mas de extrema importância para qualquer projeto na área.

Com isso a composição gravimétrica dos resíduos sólidos de origem domiciliar e comercial dos municípios escolhidos seguiu-se a metodologia de “quarteamento de resíduos” com base na NBR 10.007/2004 que pode ser resumida da seguinte forma:

Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré- homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado (NBR 10.007, 2004).

3.3.4. Amostras dos resíduos

Cabe enfatizar que as amostras coletadas foram escolhidas juntamente com técnicos existentes nos municípios, coletadas e acondicionadas em tambores de 200 litros (Figura 12), e transportadas em um caminhão caçamba, uma vez que os caminhões compactadores diminuem

o seu volume e compactam os componentes, dificultando a triagem para o processo de composição gravimétrica. Posteriormente, os resíduos foram despejados sobre uma lona plástica (Figura 13).

Figura 12 – Tambores utilizados para realização da caracterização física dos RS.



Fonte: Autor (2019).

Figura 13 – Lona utilizada para a realização da composição gravimétrica dos resíduos.



Fonte: Autor (2019).

Iniciando-se o processo de quarteamento, conforme ilustrado na Figura 14, ou seja, a divisão em quatro partes do total de 800 litros de resíduos dispostos. Duas das partes com menor diversidade de materiais obtida pelo quarteamento, e localizadas em posição

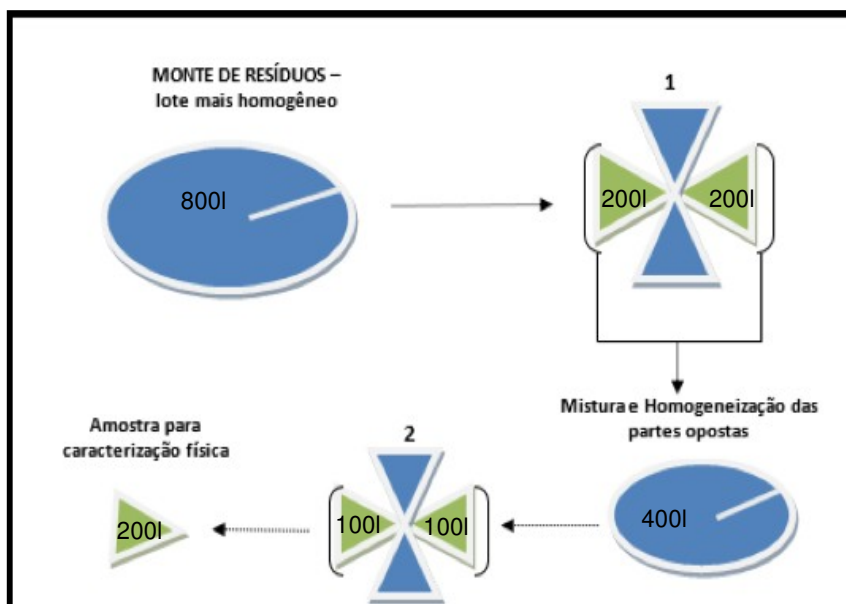
diametralmente opostas foram descartadas. O procedimento foi repetido obtendo uma amostra final de 200 litros, seguindo a esquematização da Figura 15.

Figura 14 – Quarteamento de resíduos realizado in loco.



Fonte: Autor (2019).

Figura 15 - Esquematização do Processo de Quarteamento de Resíduos Sólidos.



Fonte: IPT, 2000

Após o processo de quarteamento, foi realizada a triagem sobre a amostra final, segregando os componentes de acordo com a sua natureza. Ressalta-se que o cálculo da composição gravimétrica servirá de base para estimativa do potencial energético a partir da matéria orgânica que corresponde a etapa seguinte da metodologia, com isso, os percentuais

dos materiais apresentados foram segregados em: Material Reciclável Seco, Resíduos Úmidos Orgânicos e Rejeitos. O quadro 03 exemplifica os resíduos analisados.

Quadro 03 – Tipos de resíduos por categoria

Classe	Categoria	Exemplos
Matéria Orgânica Úmida	Material Putrescível	Restos alimentares, folhas
Material Reciclável Seco	Plástico	Sacos, sacolas, garrafas PET, embalagens.
	Papel e Papelão	Caixas, revistas, jornais, livros
	Vidro	Copos, garrafas de bebida, espelho
	Metal Ferroso	Palha de aço, agulhas, embalagem de produtos alimentícios
	Metal – Não ferroso	Latas de bebida, cobre, fiação elétrica
Rejeito	Panos, trapos, couro e borracha	Roupas, retalhos, sapato, cinto

Fonte: PROSAB, 2012.

A pesagem das amostras, dividida por categoria, foi realizada em uma balança digital (marca Líder modelo LD1050, carga máxima de 150 kg), finalizando assim o processo. O cálculo de composição gravimétrica foi realizado com base na equação 10 e posteriormente realizada uma média da Região conforme a equação 11. (IPT,2000).

$$Material (\%) = \frac{Peso \text{ da fração do material (kg)}}{Peso \text{ total da amostra (kg)}} \cdot 100 \quad (10)$$

$$\sum Média = \frac{CG01 + CG02}{2} \quad (11)$$

3.4. Estimativa do Potencial Energético

Para a conversão de biogás em energia é importante verificar a forma de tratamento que o biogás receberá e a fração que será recuperada e utilizada para conversão energética (HELDER,2013). Para o cálculo de estimativa do biogás utilizou-se dois métodos: O método do IPCC (2006) para os cenários de uso de lixões e aterro sanitário e a Potência útil elétrica em Biodigestores.

3.4.1. Estimativa do Potencial de Energia e Potência Elétrica em Aterros Sanitários.

Dentre os métodos apresentados para avaliação do potencial de geração de biogás e o aproveitamento energético no capítulo anterior, optou-se utilizar o método desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006) devido a sua fácil aplicabilidade, credibilidade científica, e utilização da composição gravimétrica realizada in loco tornando a estimativa mais precisa.

Para tal estimativa se faz necessário o cálculo do carbono biodegradável presente no resíduo sólido doméstico (Equação 12) e o cálculo do potencial de geração do metano (Equação 13), utilizando dados da composição gravimétrica realizada preteritamente.

$$DOC = (0,4. A) + (0,16. (B + C) + (0,3. D) \quad (12)$$

Onde a partir da composição gravimétrica será possível obter:

A= papel, papelão e tecidos

B+C=Alimentos e resíduos orgânicos

D= madeira/poda

Após o cálculo do DOC, é necessário calcular o potencial de geração de biogás no resíduo.

$$LO = FCM. DOC. DOCf. F. (16/12) \quad (13)$$

Onde:

FCM = Fator de correção do metano

DOC= Carbono orgânico biodegradável (kg de C/kg de RSD)

DOCf= fração de DOC dissociada (%), sendo 0,77 a fração altamente degradável no resíduo sólido brasileiro (CUNHA 2002).

F= fração em volume de metano no biogás (%); sendo em média 50% de metano com pouca diluição no Ar (CUNHA, 2002).

(16/12) = fator de conversão de Carbono em Metano (kg de CH₄/kg de C)

O Fator de Correção do Metano (FCM), que avalia a qualidade do aterramento do lixo, indica um valor de 0,4 para lugares de deposição inadequada (lixões) e com profundidades de lixo menores que 5 metros; de 0,8 para lugares de deposição inadequados, porém com profundidades de lixo maiores que 5 metros; e 1 para locais adequados, com deposição controlada de lixo, material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno.

L0 é calculado a partir da Equação 13 em kg CH₄/kg RSD. Logo, para que a unidade seja transformada para m³biogás/tonRSD deve-se dividir o valor de L0 obtido por 0,0007168 ton/m³ (densidade do metano). (CAVALCANTE,2012).

Posteriormente optou-se por utilizar o Método de Decaimento de Primeira Ordem I (USEPA 2, 1997; IPCC, 1996) considerando a geração de biogás por uma quantidade de resíduo depositada ano a ano e constante de decaimento (k), que varia em função da disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade e precipitação pluviométrica da região, estes valores variam de 0,01 ano⁻¹ a 0,09 ano⁻¹. Segundo o World Bank (2003), para regiões com precipitações anuais médias maiores que 1.000 mm e resíduos considerados de alta decomposição o valor de (k) pode ser considerado como sendo 0,09 ano (HERLDER,2013).

$$\sum Q_x = KL_0 \sum (R_x e^{-k(x-T)}) \quad (14)$$

Em que:

Q_x = vazão do biogás (m³ biogás/ano);

k = constante de decaimento (1/ano);

L₀ = potencial de geração de biogás (m³/kg);

R_x = fluxo de resíduos (t/ano);

x = ano atual;

T = ano de deposição do resíduo.

E por fim foi estimada a Potência Elétrica disponível a partir da Vazão encontrada (Q), Poder Calorífico Inferior do Biogás (PCI), Eficiência de coleta de gases (%) e o rendimento elétrico, conforme a equação (15). (FIRMO,2017)

$$POT = (Q * PCI \text{ biogás} * E * n) \quad (15)$$

3.4.2. Estimativa do Potencial de Geração de Biogás e Potencia Elétrica em Biodigestores.

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano existente na mistura gasosa, portanto, o biogás é mais energético quando sua quantidade de metano for maior. Considerando-se um percentual de 55% de CH₄ em tratamento de

Biodigestores. A equação 16 fornece a estimativa da vazão de biogás em biodigestores. (PEREIRO, 2015).

$$Q_{CH_4} = M_i \cdot \text{Produção do Biogás} \quad (16)$$

Onde:

$Q_{m^3CH_4/ton.dia}$ = Emissões de CH_4 ($kgCH_4$);

M_i = massa de resíduo orgânico tratado biologicamente (ton);

P = Produção do Biogás em biodigestores.

A estimativa da energia elétrica gerada a partir da queima do biogás através de um biodigestor anaeróbio foi calculada de acordo com a equação 17, considerando os seguintes parâmetros:

$$PE \text{ (biodigestor)} = \eta \times PCI \text{ biogás} \times RB(t) \quad (17)$$

Onde:

η = eficiência térmica dos motores de eficiência interna considerada 35% (ROCHA, 2016).

$PCI \text{ biogás}$ = Poder Calorífico do Biogás ($kJ \cdot Nm^{-3}$)

$RB(t)$ = Taxa de produção de biogás.

Após a coleta dos dados os mesmos foram tabulados utilizando um computador notebook e Microsoft Excel 2016 para realização de cálculos e elaboração de gráficos e tabelas.

3.5. Construção dos Cenários em Curto e Médio Prazo da Gestão de Resíduos no Maciço de Baturité.

A metodologia de construção dos cenários da Região do Maciço de Baturité foi construída a partir da caracterização da área e projeções realizadas anteriormente. Os referidos procedimentos apontaram o desenho do Modelo Tecnológico e Rota Tecnológica ideal em 02 Cenários distintos compreendidos entre os anos 2019 a 2028 definidos da seguinte forma:

- Cenário a 5 anos (2024): Coletas Seletivas Múltiplas implantada e operada + Aterro Sustentável, seguindo o modelo tecnológico proposto para Região;
- Cenário a 10 anos (2028): Coletas Seletivas Múltiplas implantada e operada + Digestão Anaeróbia + Compostagem + Aterro de Rejeito.

Após a definição dos cenários os dados levantados e projeções foram organizados dentro das categorias definida no gerenciamento de resíduos desde a geração até a disposição

final, conforme o esquema abaixo e os aspectos relevantes tais como: Econômico, Social e Ambiental.

GERAÇÃO DE RESÍDUOS

- Estimativa de Geração de Resíduos Sólidos Doméstico;
- Estimativa de geração do Potencial de resíduos Recicláveis, Compostáveis e Rejeitos.

COLETA E TRANSPORTE

- Segregação na origem;
- Sistemática da Coleta;
- Rota Tecnológica;

**TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO
FINAL**

- Estimativa do Potencial Energético da Região
- Mecânico
- Biológico
- Térmico

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este Capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos através da aplicação dos procedimentos metodológicos, no qual foi dividido em 02 subtópicos: Estimativas e projeções, apresentando os dados calculados e Construção dos Cenários curto e médio prazo, dentro da estrutura organizacional definida no capítulo anterior.

4.1. Estimativa e Projeções

O resultado obtido a partir das estimativas populacional de resíduos sólidos para os anos compreendidos entre 2019 e 2028 foram apresentados na tabela 02 com os anos referenciais de 2019, 2024 e 2028. Verificou-se uma taxa de crescimento populacional e resíduos de 9% ao ano. Esses valores são dados base essenciais para as projeções e estimativas dos cenários futuros.

As estimativas mostram uma região composta por pequenos municípios, onde 50% destes possuem uma população inferior a 20.000 habitantes, porém geração de resíduos per capita elevada, ressaltando a importância do fortalecimento do consorcio intermunicipal já existente para implantação de tecnologias de gestão integrada de Resíduos Sólidos.

O município de Baturité se destaca com a crescente estimativa populacional e geração de resíduos, recebendo o título cidade polo administrativa da região e do Consorcio, inclusive um dos municípios escolhidos para sediar a construção do aterro sanitário, segundo o planejamento regional elaborado pela SEMA.

Tabela 02 – Estimativa Populacional e de Resíduos Sólidos domiciliares nos municípios da Região do Maciço de Baturité para os anos de 2019,2024 e 2028.

Municípios	População e Resíduos no período estudado					
	Pop 2019	RS t/dia 2019	Pop 2024	RS t/dia 2024	Pop 2028	RS t/dia 2028
Acarape	17.890	23,26	19.487	25,33	20.867	27,13
Aracoiaba	26.648	34,64	27.373	35,58	27.967	36,36
Aratuba	10.830	14,08	10.460	13,60	10.173	13,22
Barreira	22.192	28,85	23.795	30,93	25.161	32,71
Baturité	36.776	47,81	38.849	50,50	40.590	52,77
Capistrano	18.253	23,73	18.950	24,63	19.526	25,38
Guaramiranga	3.132	4,07	2.674	3,48	2.356	3,06
Itapiúna	21.030	27,34	22.497	29,25	23.744	30,87
Mulungu	14.452	18,79	16.420	21,35	18.186	23,64
Pacoti	12.253	15,93	12.627	16,42	12.935	16,82
Palmácia	14.333	18,63	15.816	20,56	17.113	22,25
Redenção	27.764	36,09	28.543	37,11	29.182	37,94
Maciço de Baturité	223.286	293,22	237.490	308,74	247.799	322,14

Fonte: Autor (2019).

4.1.1. Caracterização dos RSU da Região do Maciço de Baturité

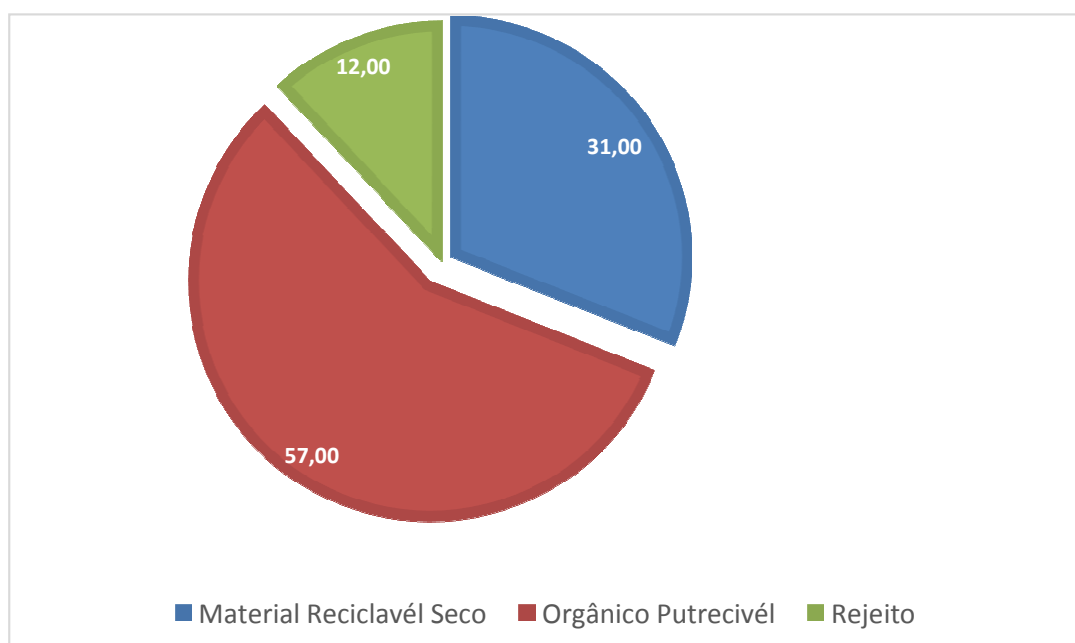
Com a aplicação da metodologia do quarteamento de resíduos (NBR 10.007/2004) realizada nos municípios representativos de Baturité (população acima de 20.000hab) e Pacoti (população abaixo de 20.000 hab) em março de 2018, a tabela 03 apresenta os dados conforme definido na metodologia apresentada para Região.

Mesmo com a coleta das amostras sendo realizadas na fonte geradora, percebeu-se que o percentual do papel e principalmente do papelão realizado no município de Pacoti foram baixos, este fato justifica-se, por haver um acordo entre a escola municipal e alguns comércios com um único catador do município que comercializa esses materiais, da mesma forma que os vidros, pois segundo os moradores os comerciantes acondicionam esses materiais em seus estabelecimentos devolvendo-os aos fornecedores, sendo desprezível nas amostras.

As informações expostas no gráfico 01, indicam que a região gera materiais com alto potencial de reciclagem ou reaproveitamento (metal ferroso, metal não ferroso, plástico duro, plástico mole, papel/ papelão, vidro, poda e matéria orgânica) com um percentual de 88%,

ou seja, apenas 12% dos resíduos gerados dentro da região que deveriam ir para um local de disposição final.

Gráfico 01 - Percentuais do Materiais recicláveis da Região



Fonte: Autor (2019).

Tabela 03 - Composição Gravimétrica dos Resíduos da Região do Maciço de Baturité

Município	Metal	Plástico Firme	Plástico Filme	Papel/ Papelo	Vidro	Resíduo Orgânico Putrescível	Tetrapack	Poda	Rejeito
Aracape	3,9	10,2	1,6	5	0	40,5	5,5	6,7	7,1
Aracoiaba	5,3	10,8	7,3	8,6	3,2	40,5	1,6	8	19
Aratuba	3,9	10,2	1,6	5	0	59,5	5,5	6,7	7,1
Barreira	5,3	10,8	7,3	8,6	3,2	40,5	1,6	8	19
Baturité	5,3	10,8	7,3	8,6	3,2	40,5	1,6	8	19
Capistrano	5,3	10,8	7,3	8,6	3,2	40,5	1,6	8	19
Guaramiranga	3,9	10,2	1,6	5	0	59,6	5,5	6,7	7,1
Itapiúna	3,9	10,2	1,6	5	0	59,6	5,5	6,7	7,1
Mulungu	3,9	10,2	1,6	5	0	59,6	5,5	6,7	7,1
Pacoti	3,9	10,2	1,6	5	0	59,6	5,5	6,7	7,1
Palmácia	3,9	10,2	1,6	5	0	59,6	5,5	6,7	7,1
Redenção	5,3	10,8	7,3	8,6	3,2	40,5	1,6	8	19
Tipologia Média Estimada da Região (%)	5	10,5	4,0	6,5	1,3	50,0	3,9	7,2	12,1

Fonte: Autor (2019).

É notória a elevada presença de resíduos orgânicos que pode ser entendida pelos aspectos de uma cultura rural ainda muito presente, mesmo com a urbanização do município (CEARÁ, 2017) e com ausência de tecnologias de aproveitamento desse material. Grande quantidade chega aos lixões municipais que poderia ser levada para compostagem. Seu produto, o composto orgânico, certamente poderá abastecer o forte cinturão verde presente nestes municípios, com grande impacto na agricultura familiar, principal atividade econômica da região. Como resultado, poderá trazer impactos positivos no âmbito ambiental, social e econômico, visto que a geração destes resíduos impacta o meio ambiente, gera custos com tratamento e/ou disposição, dentre outros

A tabela 04 apresenta uma comparação entre a média nacional realizada pela IPEA, 2012, os dados lançados pelo Panorama de Resíduos Sólidos Regionalizado realizado pela empresa Gaia Engenharia Ambiental no ano de 2018 e os resultados obtidos nessa pesquisa.

Tabela 04– Comparativo de composição gravimétrica.

Fonte de Pesquisa	Orgânicos (%)	Recicláveis Secos (%)	Rejeitos (%)
Média Nacional	51,9	31,9	16,7
PRGIRS	53	26	21
Autora	57	31	12

Fonte: Autor (2019).

Percebe-se uma maior diferença de percentual nos resíduos recicláveis secos, no qual pode ser justificada pela fonte de coleta das amostras para realizar o processo de quarteamento. De acordo com o PRGIRS o quarteamento foi realizado no local de disposição final dos municípios onde possivelmente os catadores retiram uma parte dos materiais recicláveis seco interferindo na pesagem final e resultados encontrados, porém neste trabalho a coleta foi realizada na fonte sem interferência de catadores mantendo a integridade da amostra.

Cabe enfatizar que os percentuais de composição gravimétrica serão mantidos constante ao longo dos anos para a construção das estimativas dos cenários futuro da Região.

4.2. Escolha de Tecnologias

A escolha da melhor tecnologia a ser utilizada considerou diversos fatores tais como: características dos resíduos, os objetivos do tratamento, custos de implantação e o local de instalação da planta, dentre outros. Desta forma optou-se pela tecnologia de digestão

anaeróbia, propondo uma Central de Valoração Orgânica (CVO), aproveitando a coleta diferenciada de orgânico proposto nas coletas seletivas múltiplas e o galpão de compostagem instalado dentro das CMR's.

Esta central seria composta por um tanque de suspensão e um digestor anaeróbio do tipo úmido e contínuo já que o resíduo ao ser tratado seria apenas de resíduos orgânico úmido. Segundo Firmo (2016), a digestão úmida, em comparação à digestão seca, apresenta, em geral, maior taxa de produção de biogás e uma maior estabilidade do processo, além de um maior controle das emissões de metano e a possibilidade de se utilizar o material digerido na agricultura como fertilizante.

4.3. Cenários

Os dois cenários construídos para a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos na região do Maciço de Baturité, foram elaborados tendo como base as estimativas realizadas, a situação atual dos sistemas de manejo de resíduos sólidos urbanos dos municípios e os projetos previstos para região, visando alcançar um modelo tecnológico ideal com a valoração energética.

4.4. Cenário Curto Prazo

Neste cenário (2019 – 2024) compreendido em um período de cinco anos considerou-se o início da implantação e operação das unidades previstas no modelo tecnológico definido para região. Para os cálculos e estimativas aplicadas neste cenário, optou-se por utilizar a média de geração anual equivalente a 131.789,39 toneladas de resíduos domésticos, e aplicando os percentuais de composição gravimétrica obteve-se 40.854,71 toneladas de recicláveis seco, 75.119,95 toneladas de matéria orgânica putrescível e poda e 15.814,73 toneladas de rejeitos.

4.4.1. Coleta e Destinação final

Seguindo o Plano de Coletas Seletivas Múltiplas, neste cenário, a coleta diferenciada está em fase de adaptação para os resíduos secos e orgânicos putrescíveis com a inclusão de catadores. No tocante à sensibilização da população estão previstas ações de educação ambiental contínua com os munícipes dentro de escolas e comunidades, pois de acordo com as pequenas experiências vivenciadas dentro do Estado. Educar a população seriam um dos maiores entraves encontrados durante o processo.

Seriam instalados e implantados na Região em estudo 12 CMR's e 31 Ecopontos, onde os resíduos secos recicláveis serão transferidos para dois polos de reciclagem: Baturité e Redenção. Baturité receberá os resíduos secos dos municípios de Aratuba, Itapiúna, Capistrano, Mulungu, Guaramiranga, Aracoiaba e Redenção receberá de Pacoti, Palmácia, Acarape e Barreira. (PGIRS, 2018).

A tabela 05 aponta os resultados da valoração dos materiais gerados, utilizando os percentuais de composição gravimétrica média obtida na pesquisa e os preços (R\$/ton ano) de venda desses materiais indicados no PRGIRS da região no ano de 2017.

Tabela 05 - Estimativa de geração por tipo de Resíduos do Maciço de Baturité

Materiais Recicláveis	%	ton./ano	R\$/kg	R\$/ton ano
Metal	5%	185,24	0,3	55.572,00
Vidro	1,30%	48,16	0,13	6.260,80
Papel/papelão	6,50%	240,81	0,15	36.121,50
Plástico filme	4%	148,19	0,3	44.457,00
Plástico rígido	10,20%	377,89	0,5	188.945,00
Tetrapark	3,4	125,96	0,15	18.894,00
TOTAL	31%	1126,25		350.250,30

Fonte: Autor (2019).

É sabido que entre a geração e a comercialização dos recicláveis secos existem muitos entraves econômicos e sociais, logo, partindo de um pressuposto que 70% destes materiais sejam separados e comercializados dentro das CMR's, a receita de venda equivaleria a R\$ 2.451.075,2 ou uma média de R\$ 20431,27 mensal que poderiam ser destinados para manutenção e operação das unidades de processamento.

Segundo o PGIRS, 2018 a estimativa do custo implantação dessas estruturas estão previstas em R\$8.559.243,58 e um custo anual de R\$1.719.947,52 para operar.

Essa perspectiva econômica demonstra a viabilidade de inserção dos catadores por meio das cooperativas ou associações nos projetos e programas, como nas unidades previstas pelo Plano de Coletas Seletivas Múltiplas, contribuindo assim para a sustentabilidade econômica do modelo tecnológico previsto. (PGIRS, 2018).

No tocante aos resíduos orgânicos úmidos putrescíveis e podas, provenientes das atividades domésticas, comerciais, feiras livres, mercados municipais, serviços de limpeza pública, serão coletados de forma diferenciada e encaminhados para o Galpão de Compostagem, cobertos e com aeração forçada inserido na CMR municipal. (PCSM, 2017).

A produção média estimada foi de 75.119,95 toneladas de resíduos orgânicos putrescíveis e podas que após o processo de compostagem o biofertilizante gerado podem ser

destinados a agricultura familiar e projetos sociais ou ainda comercializados para produção de floricultura, fruticultura e agricultura que são atividades bastantes expressivas dentro da Região.

4.4.2. Disposição Final

O modelo tecnológico adotado para região contempla o início do processo de encerramento dos lixões e a recuperação das áreas degradadas e a construção de 05 aterros sanitários com valoração energética de forma consorciada, 03 de médio porte e 02 de pequeno porte.

Logo, presumindo que 42% da média anual de projeção de resíduos (12% de rejeitos mais 30% de desperdícios nas unidades de processamento de resíduos recicláveis secos e úmidos) sejam dispostos em aterros, estimou-se o potencial de biogás através do Método de Decaimento de Primeira Ordem (USEPA 2, 1997; IPCC, 1996) e posteriormente a potência elétrica útil, conforme as etapas a seguir:

a) Cálculo do Carbono Biodegradável (COD).

Utilizando os dados da composição gravimétrica calculou-se um COD de 0,160 ton.c/tonR. Como a composição gravimétrica se manteve ao longo dos anos, consequentemente este valor também será o mesmo para os cenários futuros.

b) Cálculo do potencial de geração de metano dos resíduos (L0)

Utilizando todos os fatores de correções recomendados considerando que esses aterros a serem instalados serão bem operados para aterro sanitário FCM=1, e a densidade do metano de 0,0071ton CH₄/m³ o valor potencial de geração de metano (L0), a produção de metano em valores próximos de 115,18 m³ CH₄/tonelada de RSD.

c) Cálculo do Potencial de geração do Biogás

Após aplicação dos cálculos utilizando os dados de entrada anteriormente citados e somando todas as vazões do potencial de geração do biogás dentro do cenário estudado obteve-se os resultados apresentados na tabela 06. Esse potencial poderia gerar aproximadamente 3.737.439,95 m³CH₄/ton.Rs ou uma média anual de 747.487,99 m³CH₄/ton.Rs disponíveis para produção de energia limpa gerando impactos positivos sociais, econômicos e principalmente ambientais.

Tabela 06 - Estimativa de Vazão de Metano e Potencial Elétrica.

Anos	Qmetano (m³CH₄/t.Rs)	POT (kW/h)
2019	509.824,63	30.249,63
2020	563.541,06	33.436,81
2021	569.344,20	33.781,13
2022	629.421,28	37.345,70
2023	695.886,19	41.289,29
2024	769.422,59	45.652,46
Total	3.737.439,95	221.755,02

Fonte: Autor (2019).

Sobre o aspecto de aproveitamento do biogás estimado para produção de outras fontes de combustíveis a tabela 07 relaciona os valores de referência médio de produção de gasolina, diesel e lenha por volume de biogás com a estimativa do potencial médio do biogás estimado da região, produtos esses de alta valoração energética e econômica para região.

Sabendo que gasolina e diesel são combustíveis usuais no abastecimento de caminhões coletores e carros administrativos e relacionando-os com o preço do litro de gasolina e diesel no mês de abril de 2019, as estimativas de produção destes resultariam em uma economia de R\$ 3.905.117,12.

Tabela 07 - Comparativos entre o Biogás da RMB no ano de 2019 com outras fontes de combustível

Valor de referência Biogás (m³)	Combustíveis	Biogás Estimado Maciço de Baturité m³CH₄/ano
1,58 a 2,2	1 litro de gasolina	482.250,32 litros de gasolina
1,55 a 2,18	1 litro de diesel	491.768,41 litros de diesel
0,46 a 0,65	1 kg de lenha com 10% de unidade	1.624,97 kg de lenha com 10% de umidade

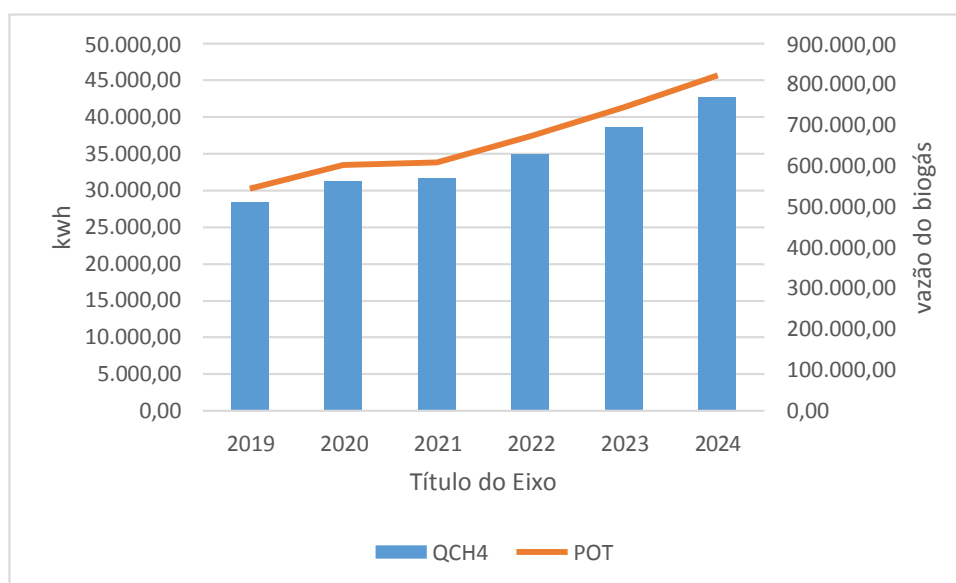
Fonte: Cavalcante, 2016, adaptada pelo autor, 2019.

Segundo Firmo, 2017 é possível realizar a estimativa do carbono equivalente com a possibilidade da venda dos créditos de carbono através dos projetos aprovados pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), com uma faixa de 3 US\$ a 5 US\$ por tonelada de CO₂ equivalente.

Para efeito de cálculo considerou a vazão do metano, taxa de eficiência de coleta de 70% um queimador de eficiência de 98% (Lima,2004) e sabendo que o poder poluente do metano é cerca de 21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono chegaremos a um valor anual médio de 777.387,51 toneladas de CO₂ equivalente. Logo se a reduções dessas emissões de CO₂ fosse comercializado no mercado mundial de créditos de carbono captaria um valor de aproximadamente R\$ 15.547.750,19 milhões de reais anual podem ser investidos em tecnologias eficientes de tratamento dos resíduos, proteção da APA de Baturité e principalmente em melhorias sociais aos profissionais que sobrevivem da comercialização dos resíduos.

Para o cálculo da potência elétrica do biogás produzido considerou-se que todo o gás captado irá passar por um processo de purificação para ser convertido em energia e aplicou-se a equação definida na metodologia de potência elétrica útil, usando uma eficiência de coleta de 85% e um rendimento elétrico de 28%. Logo a potência de geração elétrica pode chegar a 221.755,02 Kw/h. O gráfico 02 apresenta a evolução do potencial elétrico ao longo dos anos e verifica-se um crescimento acentuado de mais de 60%.

Gráfico 02 - Estimativa da Potência Elétrica (2019-2024).



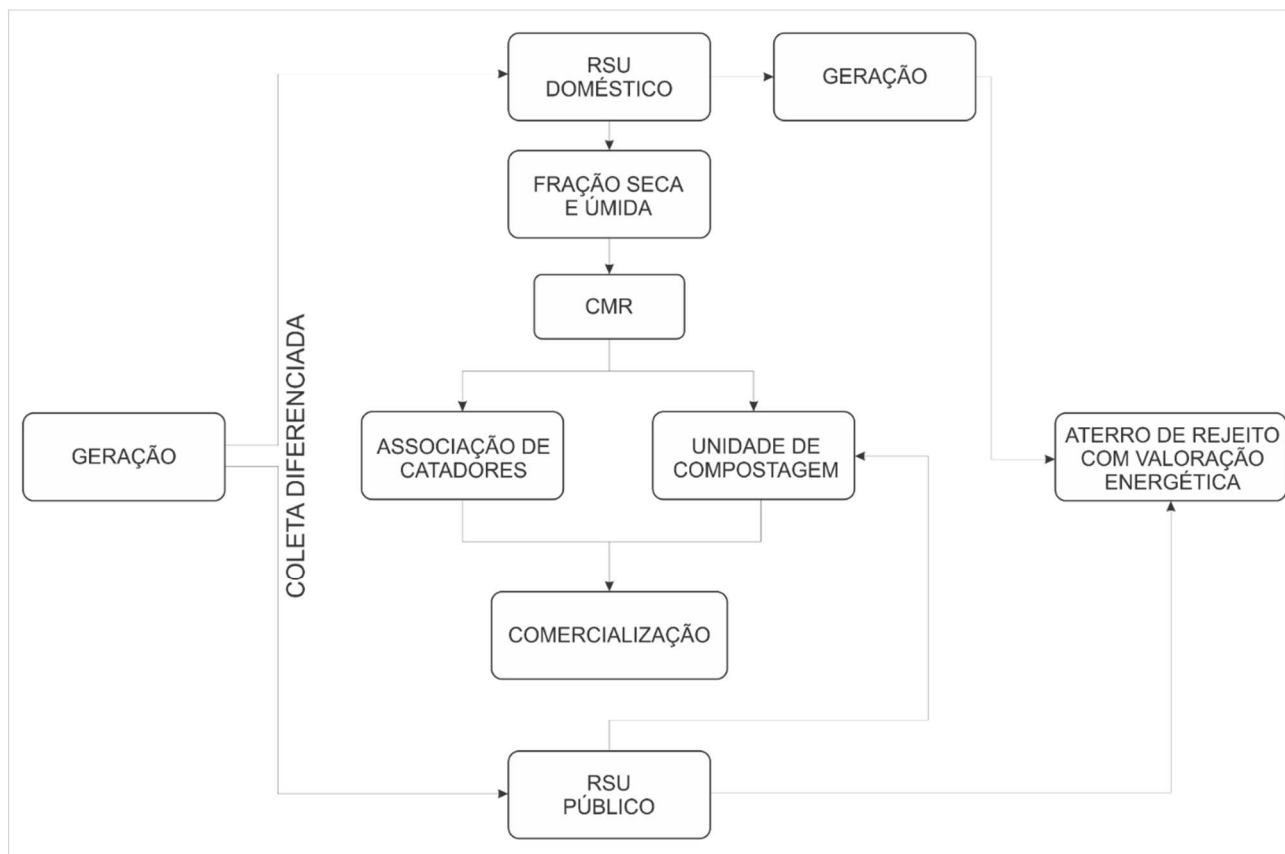
Fonte: Autor (2019).

Ressalta-se que essa energia seria destinada ao consumo nas próprias unidades de destinação final (CMR's e Ecopontos) e nos aterros sanitários da Região. No tocante a sustentabilidade econômica, se relacionarmos o valor estimado do potencial elétrico para região

com a tarifa média atual kw/h (R\$ 0,56) cobrada no Estado do Ceará, encontrou-se uma economia de R\$ 124.182,81anual.

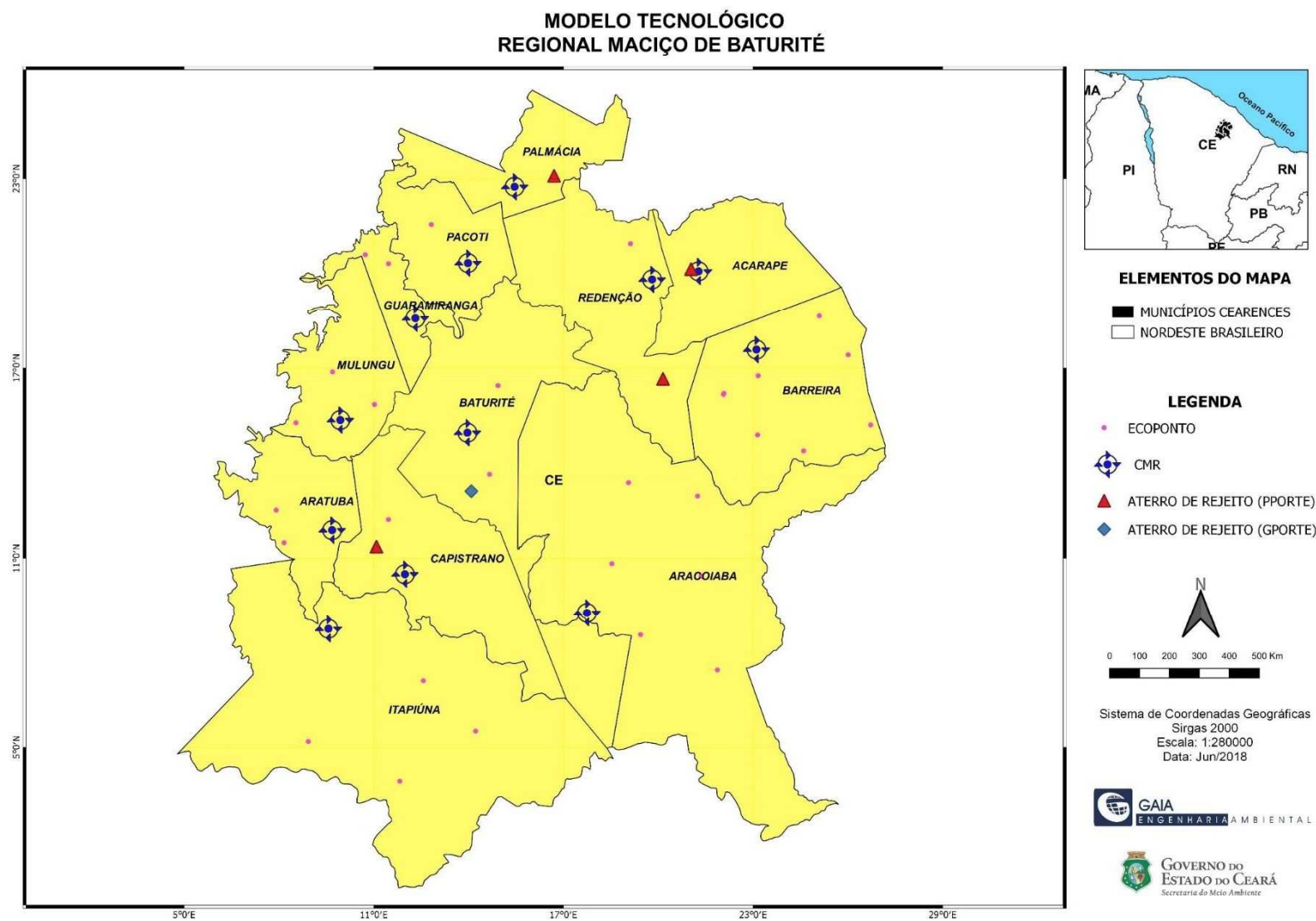
A Figura 16 apresenta o fluxograma do modelo tecnológico proposto para região nesse cenário e a Figura 17 ilustra o mapa com a localização das instalações das unidades por municípios conforme definido pelo PRGIRS,2018.

Figura 16 - Fluxograma do Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a curto prazo



Fonte: Autor (2019)

Figura 17 - Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a curto prazo



A proposta deste cenário buscou apresentar um modelo tecnológico e uma rota tecnológica pautada no Plano de Coletas Seletivas Múltiplas sob a ótica da geração de energia, objetivando suprir as necessidades das próprias unidades de processamento e ainda utilizar combustíveis na própria frota de coleta, ou seja, tornar o sistema de gestão um ciclo de vida dos resíduos de forma sustentável.

4.5. Cenário Médio Prazo - 2028

O cenário previsto para o ano de 2028 considera o cumprimento de todas as legislações vigentes e o alcance de todas as metas estabelecidas para região previstas nos PCSM e PRGIRS, prevê a estabilidade do processo e o pleno funcionamento do aterro sanitário com condições para o avanço de tecnologias para o tratamento da gestão integrada da região.

A população total para o ano de 2028 atingiria cerca de 247.799 habitantes e uma geração de resíduos de 117.580,43 ton/ ano, sendo 36.449,93 toneladas de recicláveis secos, 67.020,84 toneladas de matéria orgânica putrescível e poda e apenas 14.109,65 toneladas de rejeitos.

4.5.1. Coleta diferenciada e Destinação Final

Este cenário conta com uma coleta diferenciada já estabilizada com dias e horários distintos para os resíduos secos e orgânicos putrescíveis, a coleta seria realizada nas áreas urbanas e rural com uma taxa de atendimento 100%. Estima-se ainda um alcance de coletados resíduos recicláveis e úmidos na fonte de 100%, que serão encaminhados para as CMR's e para Central de Valoração de Orgânico (CVO) para tratamento e comercialização.

As ações de educação ambiental são realizadas em conjunto com os agentes municipais de saúde, atuando nos domicílios e escolas, pois o modelo tecnológico proposto dependerá de uma coleta eficiente com segregação efetiva dos materiais na fonte.

A tabela 08 apresenta o quantitativo de geração dos recicláveis secos apenas para o ano de 2028, visando analisar o potencial de comercialização desses materiais, considerando os percentuais de composição gravimétrica média e os preços (R\$/ton) de venda desses materiais indicados no PRGIRS, 2017.

Tabela 08 - Estimativa do Potencial econômico dos Resíduos Sólidos do Maciço de Baturité

Materiais recicláveis	%	ton./ano	R\$/kg	R\$/ton ano
Metal	5%	5.674,29	0,3	1.702.287,00
Vidro	1,3%	1.475,32	0,13	191.791,00
Papel/papelão	6,5%	7.376,58	0,15	1.106.486,55
Plástico filme	4%	4.539,43	0,3	1.361.829,60
Plástico rígido	10,2%	11.575,55	0,5	5.787.775,80
Tetrapark	3,4	4.425,95	0,15	663.891,93
Total	31%	37.095,11		10.814.061,88

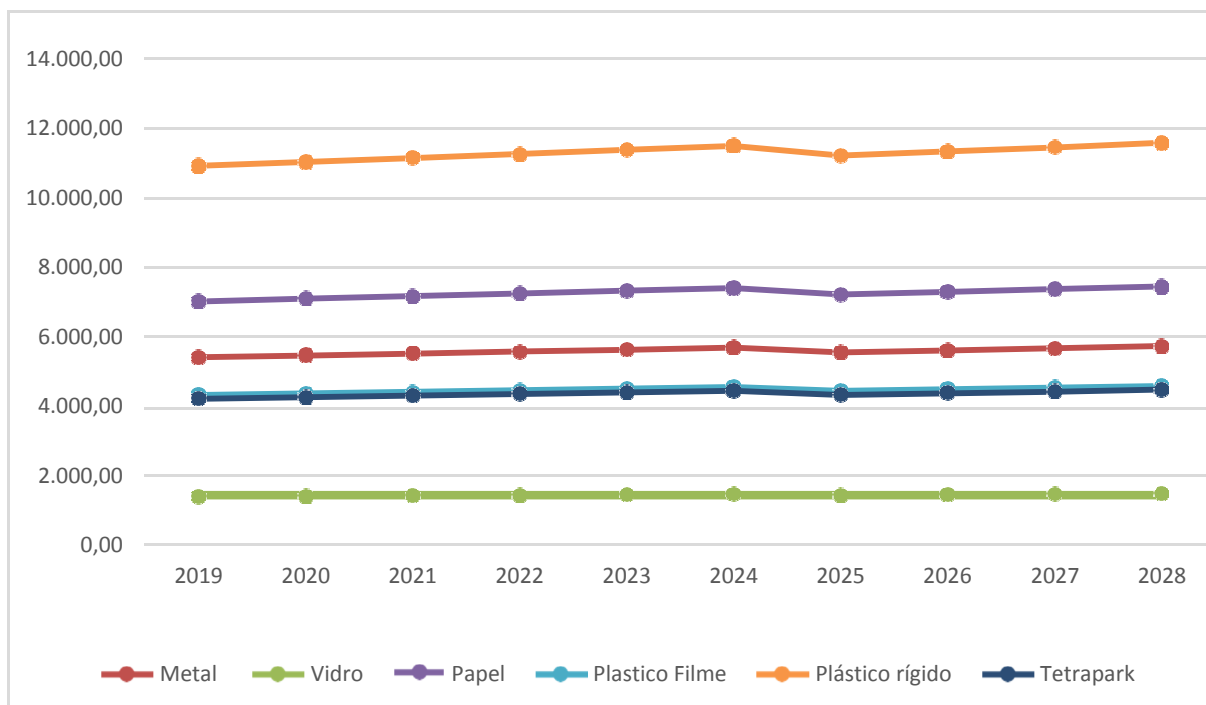
Fonte: Autor (2019).

Em termos de comercialização e avaliação do potencial econômico neste cenário, considerou para o ano de 2028 a organização de catadores em cooperativas e associações trabalhando profissionalmente dentro das CMR's e ecopontos, e o cumprimento da meta estabelecida no PCSM de 85% de aproveitamento destes materiais para comercialização.

Fazendo uma relação entre os valores da tabela 08, estimou-se um valor mensal de R\$ 9.191.952,60 ano ou R\$765.996,05 mensal a serem arrecadados e destinados na expansão e inovação tecnológica das unidades de processamento destes materiais.

O gráfico 03 indica o comportamento do crescimento de geração desses resíduos no período dos 10 anos analisados e observa-se pouca variação de geração desses resíduos. Nota-se a alta produção de plástico rígido, representando cerca de 31,2 % do total arrecado estimado e em seguida o papel, materiais com alto poder reciclador e de fácil comercialização.

Gráfico 03 - Evolução gerados da composição dos resíduos no cenário de referencial



Fonte: Autor (2019).

4.5.2. Central de Valoração Orgânica

Considerando o elevado potencial de geração de resíduos orgânicos putrescíveis e uma coleta diferenciada destes na fonte, os galpões de compostagens já instalados dentro das CMR's, observou-se portanto, um cenário propício para implantação de uma Central de Valoração Orgânica com a implantação de um digestor anaeróbio, visando a geração de energia limpa e biofertilizante rico em nutrientes para serem comercializados ou aproveitados na agricultura que é a principal atividade econômica da região.

Esta tecnologia quando comparada a outras possui um menor custo de implantação e exige uma menor área podendo ser instalada dentro das CMR's existentes, minimizando os custos de implantação.

O tipo de digestor implantado seria composto por um tanque de suspensão, um biodigestor anaeróbio, armazenamento dos gases e a descarga de fundo o úmido e contínuo pois este receberá apenas resíduos orgânicos úmidos. De acordo com Rocha, (2016) esses digestores possuem uma maior taxa de produção de biogás e uma maior estabilidade do processo, além de um maior controle das emissões de metano e a possibilidade de se utilizar o material digerido

na agricultura como fertilizante apenas por resíduos orgânicos úmido recomenda-se os digestores anaeróbio úmido contínuo. Segundo o mesmo autor o valor de implantação, operação e manutenção de uma Central desta custa em torno de R\$4.000.000,00 a 6.000.000,00.

Para efeitos de cálculos de Vazão do Potencial do Biogás neste cenário considerou-se apenas o ano de 2028 com a operação efetiva da CVO, e adotou-se o valor de produção do Biogás em digestores anaeróbios úmido em condições semelhantes com o adotado de 150Nm³ por tonelada de resíduos gerados Rocha (2016), logo para a geração diária de resíduos orgânico úmido foi estimada em 67.020,84 ton/ano, resultando em um potencial do biogás em 10.053.126,36 m³CH₄/ton.ano ou 27.542,81 m³CH₄/ton.dia. A tabela 09 traz uma relação comparativa da vazão do biogás da área em estudo com outros combustíveis usuais.

Tabela 09 - Comparativos entre o Biogás estimado da RMB no ano de 2028 com outras fontes de combustível

Valor de referência Biogás (m³)	Combustíveis	Biogás Estimado Maciço de Baturité m³CH₄/dia
1,58 a 2,2	1 litro de gasolina	368.007,51 litros de gasolina
1,55 a 2,18	1 litro de diesel	375.270,81 litros de diesel
0,46 a 0,65	1 kg de lenha com 10% de umidade	52,52 kg de lenha com 10% de umidade

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a tabela 09, usando-se a vazão estimada diária de biogás na CVO e os valores médio de referência, seria produzido aproximadamente 743.278,3192 litros de gasolina e diesel, combustíveis que poderiam ser utilizados no abastecimento dos equipamentos utilizados no gerenciamento de resíduos e carros administrativos na Região em estudo.

Sabendo que os caminhões coletores de resíduos são abastecidos com diesel com uma média de capacidade no tanque de 275 litros e carros administrativos com capacidade de 55litros de combustíveis, com produção de biogás estimada resultaria no abastecimento de 1.365 caminhões coletores para a realização da coleta diferenciada domiciliar em todo o território e 7.000 carros administrativos para melhor gestão entre os municípios da região durante o ano de 2028.

Em termos de valores, relacionando esse quantitativo com os preços destes combustíveis em abril de 2019, geraria uma economia média para toda região de R\$ 2.991.271,54 que podem ser destinados para manutenção e operação do Biodigestor.

Ressalta-se que toda a geração do biogás tem por finalidade a sustentabilidade econômica, ambiental e social do sistema de gestão integrada de resíduos da Região.

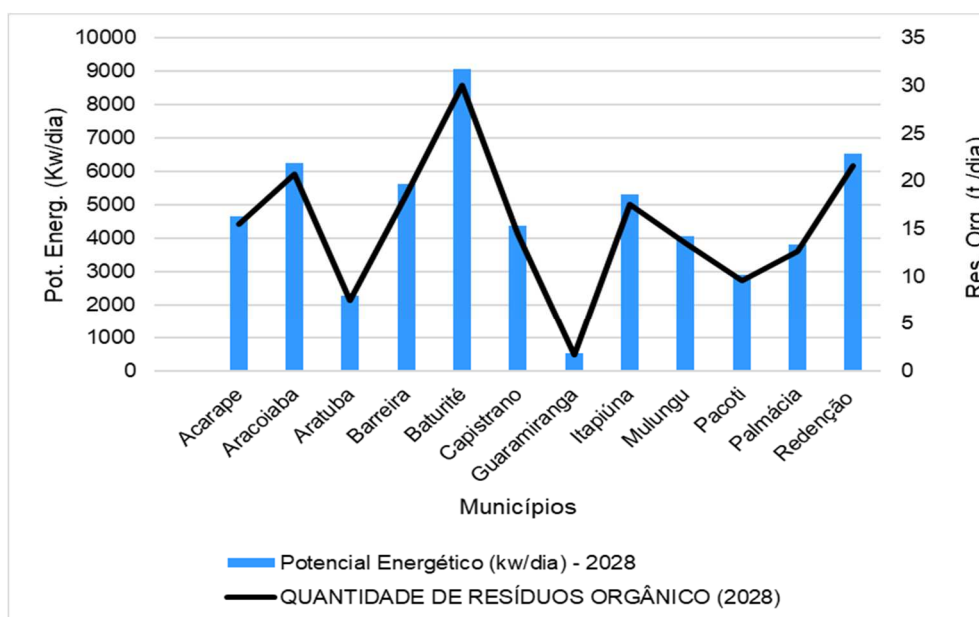
No tocante ao potencial energético aplicando o cálculo definido na metodologia e considerando, a geração de resíduos orgânico, produção médio de biogás de 150Nm³/ton.dia o PCI do Biogás de 20,71 MJ/ton.dia e convertendo o resultado para KW/h obteve-se uma potência aproximada de 55.456,69 KW/h. ou 55,4 MWh.

No tocante a sustentabilidade a CVO geraria uma energia renovável que abasteceria todas as unidades de destinação e disposição final da região e ainda geraria uma economia de R\$ 31.055,74/ ano considerando o preço de 0,56/kWh.

Se o objetivo da administração do consórcio for a comercialização da energia gerada, captaria um valor de aproximadamente R\$ 8.873.069,89/ ano, segundo o preço médio de R\$160,00/ MWh previsto pelo PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) para o mês de março de 2019. Esses valores seriam destinados a novas tecnologias de valoração energética, captação e distribuição dessa energia para toda região.

O gráfico 04 apresenta o comportamento do potencial elétrico entre os municípios que compõem a região

Gráfico 04 - Potencial Energético da CVO em 2028



Fonte: Autor (2019).

Sobre a comercialização dos créditos de carbono, conforme citado no cenário anterior realizando os mesmos cálculos obteve-se um valor de 10.455.251,41 toneladas de CO₂

equivalente. Logo se a reduções dessas emissões de CO₂ fossem comercializados no mercado mundial de créditos de carbono a 4\$ por tonelada, captaria um valor de aproximadamente R\$ 41.821.005,65 no ano de 2028 para continuar os investimentos de implantação, manutenção e operação dentro da Região, no qual, todos os municípios obtenham um Modelo Tecnológico e uma Rota Tecnológica prevista conforme a proposta da Figura 18.

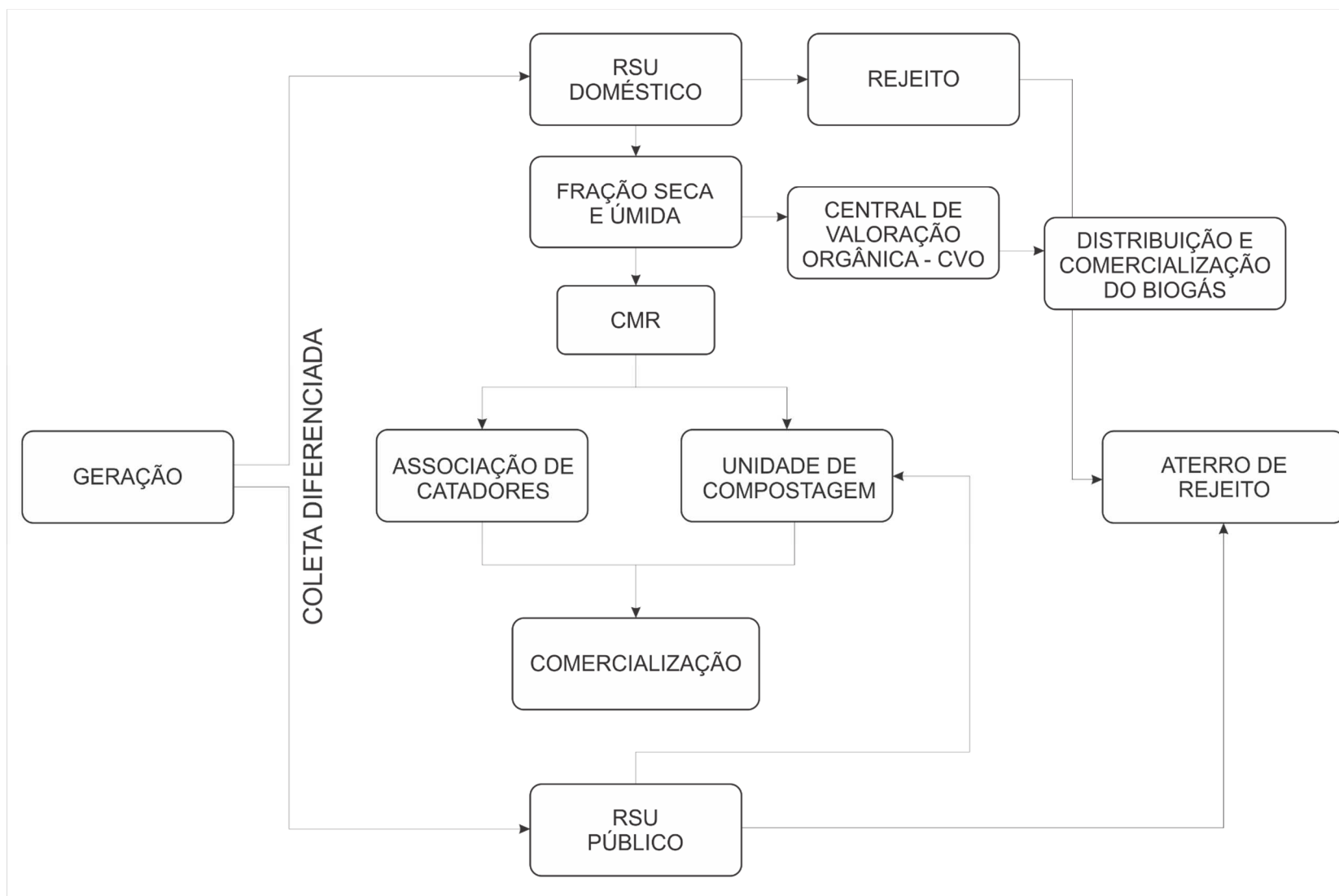
4.5.3. Disposição Final

Após o tratamento dos materiais os rejeitos estimados para este cenário de 14.109,65 ton/ano seriam encaminhados para o aterro sanitário de rejeito sem valoração energética, uma vez que não será depositado materiais como poder de geração de biogás.

Ressalta-se que todos os lixões já foram encerrados, onde as suas áreas estão em fase de recuperação e requalificação para um espaço público.

A proposta deste cenário buscou apresentar um modelo tecnológico e uma rota tecnológica voltada para geração de energia, objetivando suprir as necessidades das próprias unidades de processamento e ainda utilizar combustíveis na própria frota de coleta, ou seja, tornar o sistema de gestão um ciclo de vida dos resíduos de forma sustentável pautadas na PNRS e PERS.

Figura 18 - Fluxograma do Modelo Tecnológico do Maciço de Baturité a médio prazo



Fonte: autora, 2019

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesquisa apresentada, buscou explorar a gestão integrada de resíduos sólidos através de uma rota tecnológica voltada para o aproveitamento energético, visando a preservação da APA do Maciço de Baturité e o auxílio na tomada de decisão dos gestores integrando academia com a gestão pública do Estado do Ceará.

O diagnóstico atual da Região em estudo foi realizado através de fontes atuais e trabalhos de campo e concluiu um cenário crítico na gestão de resíduos com uma elevada geração de GEE sem o tratamento e aproveitamento, gerando impactos ambientais dentro da Região

A composição gravimétrica dos resíduos teve sua maior parcela composta por resíduos orgânicos e recicláveis somando 88% e apenas 12% são rejeitos indicando resíduos de potencial econômico e energético.

A proposta realizada para os dois cenários estimou o potencial de geração de energia limpa para suprir as necessidades das próprias unidades de processamento e ainda utilizar esses combustíveis nos equipamentos de coleta, ou seja, tornar o sistema de gestão um ciclo de vida dos resíduos de forma sustentável.

A partir do diagnósticos e estimativas concluiu-se que é possível a implantação do modelo tecnológico propostos para os dois cenários, visando a sustentabilidade econômico, financeiro e ambiental.

O trabalho deve ser levado junto à Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Associação dos Municípios do Maciço de Baturité (AMAB), uma vez que esta vem implantando e inovando em suas políticas públicas para gestão de resíduos e implantando os Planos de Coletas Seletivas Múltiplas, estruturando o consorcio existente, recentes elaborados que não contemplam a valoração energética a partir dos resíduos sólidos.

Através dos dados dos Planos de Resíduos atuais e recém elaborados a mesma metodologia também pode ser aplicada para cada Região do Estado, sendo possível dessa forma calcular o potencial de aproveitamento de biogás para futuros aterros ou outras metodologias e os incentivos financeiros advindos da possível comercialização no mercado de carbono, desconsiderando os incentivos financeiros que ainda poderiam ser obtidos pela comercialização de energia, considerando as particularidades regionais do Estado.

Cabe ressaltar a importância do aprofundamento dos estudos detalhados dos tipos de biodigestores ideais para região fazendo uma relação dos custos benefícios, visando a captação de recursos com fontes de crédito para implantação de um cenário ideal para Região.

Sugere-se trabalhos relevantes a situação dos catadores mediante a implantação dos Planos de Coletas Seletivas Múltiplas e com encerramento dos lixões e ainda a comercialização dos resíduos recicláveis seco e os resíduos orgânico.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10.007. Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017. São Paulo: ABRELPE, 2017.

AQUINO, A. M.; OLIVEIRA, A. M. G.; LOUREIRO, D. C. Integrando Compostagem e Vermicompostagem na Reciclagem de Resíduos Orgânicos Domésticos. Circular Técnica, Embrapa. 2005, Seropédica, Rio de Janeiro. ISSN: 1519 – 7328.

ARAÚJO, A. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. 2017. f. 42. Monografia (Bacharelado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

ASASE, M; ERNEST, K; YANFU, L; MENSAH, M; STANFORD, J; AMPONSAH, S. Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: A case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana. Waste Manag., v. 29 , p. 2779-2786, 2009.

BARCELOS, B. R. Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. 2009, 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BARROS, R. T.; ASSIS, C. A.; BARROS, E. L.; SANTOS, F. N. B. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em municípios do Vale do Jequitinhonha (MG). Anais: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R., IN: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.) Uso agrícola de lodo de esgoto – Avaliação após a resolução nº 375 do

BERTICELLI, R.; PANDOLFO, A.; KORF, E. P. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: perspectivas e desafios. *Revista de Gestão e Sustentabilidade*, v. 5, n. 2, p. 711 – 744, out2016/mar2017, 2017.

BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. Jaboatão do Guararapes, PE: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Capacidade Instalada de Geração Elétrica – Brasil e Mundo (2016)*. Brasília, 2017.

BRITO JUNIOR, L. F. Estudos de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. Dissertação. Dissertação Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação de Engenharia. Rio de Janeiro, 2005.

_____. Lei nº. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Seção 1. Brasília, terça feira, 03 agosto 2010.

CARLINI, M.; COSCONI, E. M.; CASTELLUCCI, S.; VILLARINI, M.; COLANTONI, A. An Economical Evaluation of Anaerobic Digestion Plants Fed with Organic Agro-Industrial Waste. *Energies*, v. 10, N. 1165, 2017. DOI: 10.3390/en10081165.

CAMPUZANO, F.; Brown, R. C. Martínez, J. D. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.102, p 372-409, 2019.

CARVALHO JR., Francisco Humberto Carvalho, Estudos de indicadores de sustentabilidade e sua correlação com a geração de resíduos sólidos urbanos na cidade de Fortaleza-ce. Dissertação Tese do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013

CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. Apostila da disciplina de resíduos sólidos. Fortaleza: IFCE, 2009.

CAVALCANTE. Reinaldo Fontes. Potencial de produção de biogás, para uso como energia, através de resíduos sólidos domiciliares no Sertão Central Cearense. Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, 2012.

CEARÁ. I&T Gestão de Resíduos. Secretaria do Meio Ambiente (Ed.). Planos Regionalizados de Coletas Seletivas Bacia Hidrográfica Metropolitana Região Maciço de Baturité. I&T Gestão de Resíduos, 2017. 118 p.

CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Decreto nº 32.164, de 2017. Altera o decreto nº 25.777 de 2000, que dispõe sobre a poligonal do corredor ecológico do rio Pacoti e dá outras providências. Ceará, CE, 2017.

CEARÁ (Estado). SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Plano Regional de Resíduos Sólidos do Ceará. Fortaleza, 2018.

CEARÁ (Estado). Lei nº 16.032, de 20 de junho de 2006. Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado, Ceará, 2016.

CEARÁ (Estado). SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Ceará. Fortaleza, 2016.

CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem (Brasil). Agência de Proteção Ambiental (EPA) (Org.). Reciclagem nos Estados Unidos: desafios semelhantes ao Brasil. 2014. Disponível em: <<http://cempre.org.br/cempre-informa/id/89/reciclagem-nos-estados-unidos--desafios-semelhantes-ao-brasil>>. Acesso em: 08 abr. 2018.

CETESB/SMA – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 – aterros. São Paulo, 2003, 349 p.

COMISSÃO EUROPEIA. (Conselho da União Europeia). Diretiva 2008/98 relativa aos resíduos e que revoga certas diretivas. 1998. Disponível em:

<<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:pt:PDF>>

Acesso em: 03 Mai. 2018.

CONSONI, Â. J.; PERES, C. S.; CASTRA, A. P. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. Capítulo II – Origem e composição do lixo. 3ª ed. IPT/CEMPRE: São Paulo: 2010.

COSTA, D.F. Geração de energia elétrica a partir de do Biogás de tratamento de esgoto. São Paulo, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. 380p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5).

CZAJCZYŃSKA, D. ANGUILANO, L. GHAZAL, H. KRZYŻYŃSKA, R.; REYNOLDS, A.J.; SPENCER, N.; Jouhara, Potential of pyrolysis processes in the waste management sector Thermal. Science and Engineering Progress, v. 3, p. 171-197, 2017. DOI: 10.1016/j.tsep.2017.06.003.

_____. Tramitty Serviços Ltda Epp. Governo do Estado do Ceará. Proposta de Regionalização para a Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará. Ceará: Tramitty. 2012. p. 80.

_____. Caderno regional das bacias Metropolitanas. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP, 2009.

_____. Decreto nº 24.958, de 1998. Altera o decreto nº 20.956 de setembro de 1990. Ceará, CE, 1998.

_____. Decreto nº 20.956, de 1990. Dispõe sobre a APA da serra de Baturité e dá outras providências. Ceará, CE, 1990.

DEGANUTTI, Roberto, PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido, ROSSI, Marco et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP) [online]. 2002 [cited 17 March 2019]. Available

from:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=iso>.

DANTAS, G. R.; LEITE, V. D.; COSTA, E, M. Estudo da diversidade microbiana em processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA AGROPECUÁRIA, AGRÍCOLA E AMBIENTAL (CBMAAA). Ciência e Tecnologia: FATEC – JB, v. 8, n. especial, 2016. ISSN: 2178 – 9436.

DE BAERE L., (2003) State-of-the-art of anaerobic digestion of municipal solid waste, Proceedings of the 9th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália; 6 -10 Outubro 2003.

DEUS, R. M.; BATTISTELLE, R. A. G; SILVA, G. H. R. Scenario evaluation for the management of household solid waste in small Brazilian municipalities. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 19, p. 205 - 214, 2017.

DHYANI, V; BHASKAR, T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. Renewable Energy, v 129, 2018.

DIMATTEO, U.; NASTASI, B.; ALBO, A.; GARCIA, D. A. Energy Contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to Energy-Environmental Sustainability in Urban Areas at Small Scale. Energies, v. 10, n. 229, 2017. DOI: 10.3390/en10020229.

EPA – United States Environmental Protection Agency. Landfill gas emissions model (LandGEM) Version 3.02. 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

EUROPEAN COMISSION. Being wise with waste: the EU's approach to waste management. 2010. Disponível em: < <http://ec.europa.eu/environment/waste/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa. Estimativa da Geração do Metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco seguindo as diretrizes do Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Publicação revista DAE , v 66. Julho.2017.

FOSTER, A.; ROBERTO, S. S.; IGARI, A. T. economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTAL. 2016. ISSN – 2359-1048.

FRIGO, K.D.A.; FEIDEN, A.; GALANT, N.B.; SANTOS, R.F.; MARI, A.G.; FRIGO, E.P. Biodigestores: seus modelos e aplicações. Acta Iguazu, Cascavel, v.4, n.1, p. 57-65, 2015.

GALVÃO, L.C.R; M.A; RIBEIRO, F.S. Energia de resíduos sólidos como mecanismo de desenvolvimento limpo. Encontro de Energia nomeio Rural, 2002.

GARDNER, G. Municipal solid waste growing. 2012. Disponível em: <<http://www.worldwatch.org/global-municipal-solid-waste-continues-grow>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

GASPAR, R. M. B. L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias Propriedades rurais com ênfase na agregação de Valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR. 2003, f. 119. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991

GOMES, L. P. Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. São Carlos, 1989. 166p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GOMES, F. C. S. P.; AQUINO, S. F.; COLTURATO, L. F. D. B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 17, n. 3, p. 295 – 304, jul/set 2012.

HAUSER, P. D.; LEMME, C. F. Modelo financeiro para avaliação de projetos de incineração de resíduos sólidos municipais no âmbito do mecanismo de desenvolvimento. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 1, n. 2, p. 56 – 73, 2007.

HELDER Sumeck Necker, Ana Lúcia Denardin da Rosa Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná – RO, v. 17 n., p. 3416- 3424, 17 Dez. 2013

HENRIQUES, R. M. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica. 2004. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

IPCC - International Panel on Climate Change. Guidelines for National .Greenhouse Inventories: Reference Manual. v.3, 1996.

IPECE. Perfil das regiões de planejamento perfil das regiões de planejamento: Maciço de Baturité. Ceará, 2017. p. 23.

IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica. Manual de Gerenciamento Integrado. Lixo Municipal. 2. ed. São Paulo: 2000. p. 29.

JUCÁ, José Fernando Thomé. Alternativas Tecnológicas para Tratamento dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. Palestra ministrada na Rio+20 - Conferência das Nações Unidas. Rio de Janeiro, 2012.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 2, p. 190 – 196, 2009.

LEITE, C. B. Tratamento de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético: avaliação econômica entre as tecnologias de digestão anaeróbia e incineração. 2016, f. 117. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LIMA, L. M. Q. Lixo: tratamento e biorremediação. 3 ed. São Paulo: Hermus, 2004.

LIMA, J. D. Modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil. 2012, f. 435. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

LOPES, I. V. O. Mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL): guia de orientação. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2002.

MATA-ALVAREZ, J. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA publishing, 2003.

MACHADO, C. F. Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP. 2015. 97 f. Monografia (Engenharia Ambiental), Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

MENDEZ Pina de Gabriel. Avaliação da gestão municipal de resíduos sólidos através de indicadores ambientais. Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

Ministério de Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

MORAES, E. Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos urbanos de sete municípios da região metropolitana de Maringá, Paraná. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

MOREJON, C. F. M.; LIMA, J. F.; ROCHA, W. F.; POSSA, R. D. Proposta de Novo Modelo de Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos. In: 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production: Cleaner production initiatives and challenges for a sustainable world, São Paulo, Brazil, 2011.

MULLER, Luiz Neto Paiva. Diagnóstico e proposições para a 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, Fortaleza, 2016

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T.R.; ALAO, M.A. Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 80, p. 149 – 162, 2017.

PAVAN, M. C. O. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. 2010.187 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato*, v. 11, p. 147-157, 2012.

PEREIRA, C. D. Rota tecnológica para a gestão sustentável de resíduos sólidos domiciliares. 2014, f. 113. Monografia (Especialização em Direito Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PEREIRA, Nelson Miguel Fernandes. Monitorização de um Sistema de Valorização Energética do Biogás. Relatório de estágio apresentado para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis. Universidade de Aveiro. Portugal, Aveiro, 2015.

RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. I.; TATSIPOULOS, I. P. Combined municipal solid waste and biomass system optimization for district energy applications. *Waste Management*. v.34, p.36-48, 2014.

ROCHA, Camila Marçal. Proposta de Implantação de um Biodigestor Anaeróbio de Resíduos alimentares. Universidade Federal de Juiz de Fora. Monografia do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Juiz de Fora, 2016.

RIBEIRO, T. G.; LINS, S.C. Coleta de Lixo Domiciliar: Estudo de Caso. Caminhos de Geografia, Uberlândia, v.1, n.2, p. 50-69, dez. 2000.

RODRIGUES, A. A.L. S. (2005). Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica. Universidade de Aveiro. Tese de Doutorado. 164 p.

SALES FILHO, I. O. Avaliação da Toxicidade e Remoção de Matéria Orgânica de Efluente de Biodigestor de Resíduos Sólidos Orgânicos Tratado em Wetlands. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Caruaru, 2014.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. Resources, Conservation and Recycling, v. 131, p. 54-63, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>.

SILVA, W. R.; Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais. 2009. f. 201. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SIQUEIRA, T. M. O. D.; ABREU, M. J. D. Fechando o ciclo dos resíduos orgânicos: compostagem inserida na vida urbana. Ciência e Cultura, v. 68, n. 4, p. 38–43, 2016.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. (2016). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos: 2014. Brasília: Ministério das Cidades. Recuperado de <http://www.snis.gov.br/>.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. Revista de Engenharia Sanitária Ambiental, v. 22, n. 5, p. 993 – 1003, set/out 2017.

SECRETARIA DAS CIDADES. Estado do Ceará. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos 2018. Disponível em < <https://www.ceara.gov.br/organograma/cidades/t>> Acesso em dezembro. 2018.

T

HEMELIS, 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.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.). Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

USEPA 2 – United States Environmental Protection Agency. Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-PLUS) User's Manual. EPA-30-B-97-006, 1997.

VANDEVIVERE, P. DE BAERE, L. VERSTRAETE, W. (2002) Types of anaerobic digesters for solid wastes in biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, Chapter 4, 111-147, London, IWA Publishing.

VENKATESWARA RAO, P.; BARAL, S. S.; DEY, R.; MUTNURI, S. Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 7, p. 2086 – 2094, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.031.

VICH, D. V.; MIYAMOTO, H. P.; QUEIROZ, L. M.; ZANTA, V. M. Household food-waste composting using a small-scale composter. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 12, n. 5, p. 718 – 729, set/out 2017.

ZAGO, S. Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do Meio Oeste Catarinense. Blumenau, 2003. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós –graduação em Engenharia Ambiental.