

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor Soares Coser

**Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando de Resíduos Sólidos
Urbanos**

Florianópolis

2021

Igor Soares Coser

**Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando de Resíduos Sólidos
Urbanos**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Jefferson Luiz Brum Marques -PhD

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra

Coser, Igor

Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando
de Resíduos Sólidos Urbanos / Igor Coser ;
orientador, Jefferson Luiz Brum Marques, 2021.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências. 1. Engenharia Elétrica. 2.
Sustentabilidade. 3. Tratamento biológico de RSU. 4.
Tratamento térmico de RSU. 5. Geração de resíduos sólidos
urbanos.

I. Brum Marques, Jefferson Luiz. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.

Título

Igor Soares Coser

**Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando de Resíduos Sólidos
Urbanos**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 18 de Junho de 2021.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, PhD
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus professores e, principalmente, aos meus queridos pais que me apoiaram de todas as formas possíveis nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Jefferson, meu orientador, pela disposição e apoio durante a construção do Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo fazer um estudo das principais formas de tratamento dos resíduos sólidos urbanos, assim como seus processos, características, vantagens e desvantagens em relação a outros no contexto de geração de energia elétrica. O método de pesquisa será baseado em artigos, revisões de estado da arte, dissertações de mestrados e teses de doutorados, buscando abranger o que há de mais recente no tratamento de resíduos sólidos urbanos, acompanhado de dados estatísticos da produção, composição e destinação dos resíduos sólidos no Brasil, mas principalmente, em Santa Catarina e Florianópolis. É feita uma revisão das normas e políticas públicas que regularizam e descrevem a destinação dos resíduos sólidos municipais. Após a introdução do contexto, das normas e dados, será feita uma discussão e análise crítica sobre o que é mais viável no cenário brasileiro de implementação de tratamento de resíduos sólidos urbanos para incentivar a logística reversa, buscando compreender as problemáticas e as soluções mais próximas ao alcance visando a produção energética.

Palavras-chave: Tratamento de resíduos sólidos urbanos, logística reversa, viabilidade

ABSTRACT

This course conclusion paper aims to study the main forms of treatment of solid urban waste, as well as their processes, characteristics, advantages and disadvantages in relation to others in the context and generation of electric energy. The research method will be based on articles, state-of-the-art reviews, masters and doctorates, seeking to cover the latest in the treatment of urban solid waste, accompanied by statistical data on the production, composition and destination of solid waste in Brazil, but mainly, in Santa Catarina and Florianópolis. As well as a review of rules and public policies that regulate and describe the destination of municipal solid waste. After the introduction of the context, standards and data, a critical discussion and analysis will be made on what is most feasible in the Brazilian scenario of implementing solid urban waste treatments to encourage reverse logistics, seeking to understand the problems and the nearest solutions within reach aiming at energy production.

Keywords: Treatment of solid urban waste. Reverse logistics. Feasibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Matriz Energética Brasileira 2019.....	17
Figura 2- Fluxograma dos tipos de tratamento de resíduos sólidos urbanos.....	21
Figura 3- Ciclo de Rankine.....	33
Figura 4 - Grelha Horizontal.....	35
Figura 5- Precipitador Eletrostático.....	36
Figura 6- Filtro de Manga.....	36
Figura 7- Lavador de Gases.....	37
Figura 8- Exemplo de Usina Térmica com Pirólise.....	39
Figura 9- Esquemático de uma Usina Térmica com Gaseificação.....	40
Figura 10 - Esquemático de uma Usina Térmica com Tecnologia de Arco de Plasma.....	41
Figura 11 - Geração de RSU no Brasil.....	44
Figura 12 - Coleta de RSU no Brasil.....	44
Figura 13 - Índice de cobertura da coleta e RSU (%).....	45
Figura 14 -Distribuição dos municípios com iniciativas de coleta seletiva.....	46
Figura 15 -Disposição final de RSU, por tipo de destinação (%).....	46
Figura 16 -Disposição final de RSU coletados no Brasil (toneladas/ano).....	47
Figura 17 -Geração de RSU na região Sul.....	47
Figura 18 -Coleta de RSU na região Sul.....	48
Figura 19 -Disposição final de RSU na Região Sul, por tipo de destinação (%).....	48
Figura 20 -Estimativa de geração de energia elétrica MWh/ano no Brasil do ano de 2018 à 2030, em três casos, com 70 % dos resíduos, com 50 % dos resíduos, com 30 % dos resíduos.....	50
Figura 21 -Estimativa de geração de energia elétrica MWh/ano no Brasil do ano de 2018 à 2030, em três casos, com 70 % dos resíduos, com 50 % dos resíduos, com 30 % dos resíduos.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de destino dos resíduos em alguns países.....	18
Tabela 2 - Dados sobre alguns países.....	18
Tabela 3- PCI de materiais encontrados em RSU.....	24
Tabela 4 - Tecnologias de digestão anaeróbica.....	28
Tabela 5 - Quantidade de RSU coletada nas regiões e no Brasil.....	44
Tabela 6 - Recursos aplicados na coleta de RSU.....	47
Tabela 7 - Recursos aplicados na coleta de RSU e demais serviços de limpeza urbana na Região Sul.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos resíduos sólidos urbanos.....	26
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral.....	20
2	DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1	TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	21
	2.1.1 Normas.....	24
	2.1.2 Tratamento Biológico.....	27
	2.1.3 Tratamento Térmico.....	32
	2.1.3.1 Incineração.....	32
	2.1.3.2 Pirólise.....	38
	2.1.3.3 Gaseificação.....	39
	2.1.3.4 Tecnologia de Arco de Plasma.....	41
	2.1.4 Dados.....	42
3.	DISCUSSÃO.....	53
4	Conclusão.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Após a consolidação do sistema capitalista, no decorrer da história, muitas consequências inerentes a esse modelo se tornaram cada vez mais claras e problemáticas ao longo do tempo. A principal consequência está ligada ao consumo, ou seja, a sociedade funciona fundamentalmente com uma lógica consumista e o que está diretamente conectado a isso é a geração de resíduos.

Cada vez mais surge uma preocupação com os resíduos sólidos urbanos visto que, na maioria dos casos, há uma destinação incorreta para esses tipos de resíduos, contaminando e poluindo todo tipo de ecossistema. Hoje, fala-se, além dos prejuízos de lixões a céu aberto, das chamadas ilhas de resíduo que crescem nos oceanos, devido à escassez de terras para o destino dos resíduos, assim como pela falta de regulação e fiscalização para o destino de resíduos nos oceanos e mares. O mais preocupante dessa história é revelado por estudos recentes feitos na Universidade de São Paulo (USP), dizendo não só que o plástico, por exemplo, demora muito tempo para se degradar, como também ele gera micro resíduos, nano partículas, conhecidas como microplásticos, que se espalham rapidamente, principalmente na água, impondo muitos desafios ao seu controle. Somando-se a isso, se estuda que os microplásticos podem ser danosos tanto para os humanos, quanto para os seres vivos marinhos. Por isso, cada vez mais tem se estudado maneiras de produzir bioplásticos, os quais possuem uma melhor degradabilidade e não agridem o meio ambiente, utilizando-se de matéria prima de origem vegetal, como mandioca, milho e resíduos agrícolas.

Ainda relacionado à questão ambiental e envolvendo a destinação dos resíduos, é fato que grande parte da destinação dos resíduos no Brasil está ligada aos lixões a céu aberto e aos aterros sanitários. Esse tipo de destinação não integra o tratamento de resíduos sólidos urbanos em si e gera algumas consequências ambientais negativas como, por exemplo, a alta geração de gases poluentes, gases contribuintes para o agravamento do efeito estufa, principalmente metano e gás carbônico, risco de explosão (devido à características de serem gases altamente inflamáveis, principalmente o metano) e a contaminação do ar, devido a geração de gases com forte odor.

Por outro lado, analisando a faceta energética, mais especificamente, a matriz energética brasileira, percebe-se que a principal fonte de produção energética no Brasil é por meio de geração hidrelétrica. Cerca de 64,9% da produção energética total no Brasil é produzida pelas hidrelétricas instaladas em todo o país. É evidente o peso e a dependência do

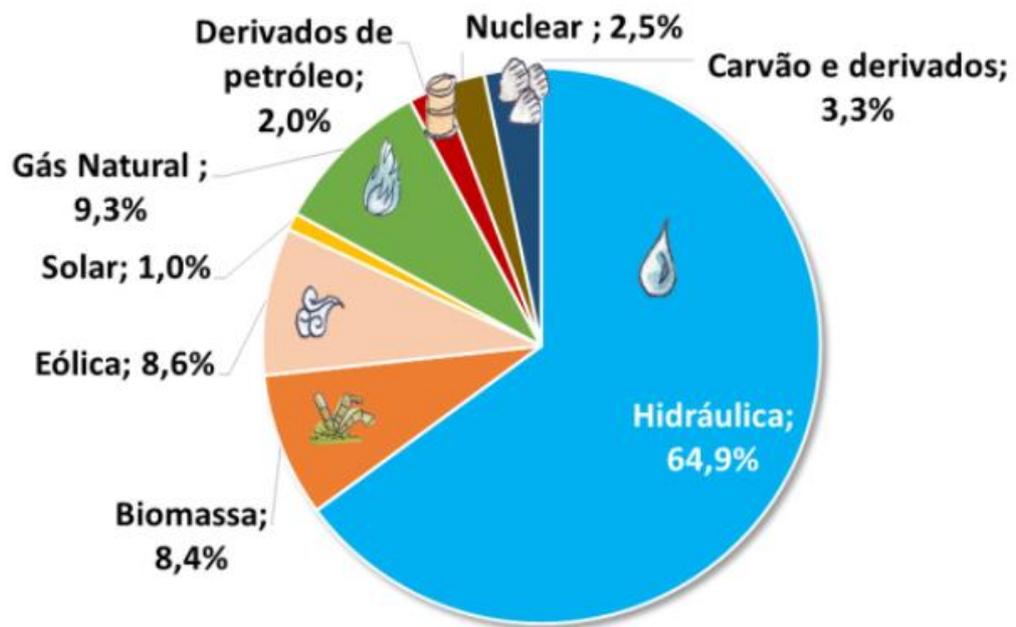
país em relação à geração hidrelétrica. Contudo, apesar de ser considerada uma forma de produção energética limpa, o que em si, já gera controvérsias, essa forma de geração de energia não é isenta de problemáticas.

A geração hidroelétrica enfrenta dois problemas centrais. O primeiro está relacionado ao clima. As hidrelétricas são extremamente dependentes da precipitação pluviométrica, pois quando não há chuva o suficiente e os reservatórios não estão com sua capacidade operacional adequada, não se pode gerar energia liberando água às turbinas, pois isso esvaziaria mais ainda o reservatório. E, nesses últimos anos, o Brasil tem sofrido secas cada vez mais rigorosas, limitando a capacidade de geração de energia nesse período, sendo necessária a complementação energética por meio de usinas termelétricas, as quais funcionam a partir da queima de carvão mineral ou derivados de petróleo, representando uma ameaça para o meio ambiente devido à emissão de gases poluentes. O segundo ponto, também crucial, é que a maioria dos lugares que carregavam o potencial para se construir hidrelétricas já foram utilizados, restando agora opções de potenciais hidrelétricas em área de demarcação indígena ou áreas de preservação ambiental permanente, o que acaba gerando muitos conflitos e discussões, assim como a destruição do ecossistema devido à inundação de uma grande área, como foi o caso mais recente relacionado à usina de Belo Monte, no Pará, a qual se encontra numa área indígena.

Outro lado dos problemas relacionados ao clima, como as alterações climáticas, a crise hídrica atual, o desmatamento e a queimada das florestas, seca e calor intensos em algumas regiões e frio extremo e enchentes em outras, a degradação de ecossistemas e extinção de algumas espécies, entre outras coisas, são fruto da intervenção direta ou indireta do ser humano sobre o meio ambiente, sobre o planeta Terra. A ação e a não ação do ser humano diante da preservação dos recursos naturais têm gerado um desequilíbrio ecológico que influencia também o clima, por consequência. Mas, o que se está falando aqui, é como a ação humana tem levado a mudanças extremas na natureza e em seus ecossistemas em curtos espaços de tempo. Portanto, se está pensando em impactos causados numa temporalidade reduzida, com efeito devastador sobre a capacidade de suporte e resiliência da própria natureza. Significa dizer que: os ciclos naturais são mudados de forma tão intensa, que eles não se recuperam com a celeridade necessária para um novo uso pela própria humanidade (Ascom UFG, 2017).

Na Figura 1 é mostrado o cenário da matriz energética do Brasil, onde se verifica como a matriz energética brasileira é pouco diversificada, tendo em sua maioria a energia hidráulica, fonte de hidrelétricas

Figura 1 -Matriz Energética Brasileira 2019.



Fonte: BEN,2020.

Outro fato relacionado à questão energética é que, conforme a sociedade se desenvolve economicamente, o que caracteriza um modelo capitalista, é necessário aumentar cada vez mais a geração de energia elétrica, não só para atender o crescimento populacional, assim como atender à indústria, visto que, no mundo atual, a energia elétrica é indispensável. Grande parte do processo produtivo de insumos gira em torno do consumo de energia da mesma forma que, quanto mais desenvolvido é um país, maior é o consumo energético e, devido ao maior poder de compra, maior é o consumo e, conseqüentemente, maior será a geração de resíduos. Ou seja, o crescimento econômico e o desenvolvimento de um país estão estritamente ligados a essas duas questões indissociáveis: a geração de energia e a geração de resíduos sólidos urbanos. Por isso, a questão do tratamento, principalmente térmico, dos resíduos sólidos urbanos já é uma pauta antiga para países desenvolvidos e com escassez de terras como, por exemplo Japão, Suíça e alguns outros países da Europa. Como pode constatar com a Tabela 1 e Tabela 2, alguns países da Europa e o Japão têm uma porcentagem significativa de destino para incineradores e para usinas de triagem e compostagem, assim

como uma porcentagem relevante de geração de energia por meio da combustão de resíduos sólidos.

Tabela 1- Porcentagem de destino dos resíduos sólidos em alguns países.

País	Aterros sanitários (%)	Usinas triagem e compostagem (%)	Incineradores (%)
Alemanha	72	3	25
Bélgica	62	9	29
Dinamarca	37	7	56
Espanha	76	16	8
França	50	20	30
Holanda	50	20	30
Inglaterra	90	1	9
Itália	56	10	34
Japão	24	4	72
Suécia	35	10	55
Suíça	6	6	88

Fonte: www.conecteducacao.com/2008.

Tabela 2 - Dados da população, quantidade de resíduos produzidos por ano, número de unidades incineradoras e porcentagem das usinas que geram energia de alguns países.

País	População (milhões)	Resíduos (milhões.t/ano)	Número de Unidades	Combustão com geração de energia (%)
Suíça	7	2,9	29	79
Japão	123	44,5	1893	72
Dinamarca	5	2,6	32	65
Suécia	9	2,7	21	59
França	56	18,5	100	41
Holanda	15	7,1	9	39
Alemanha	61	40,5	51	22

Fonte: ASME/2008.

A Tabela 2 evidencia algumas informações como população, quantidade de resíduos produzida, número de usinas e porcentagem das usinas que possuem geração de energia elétrica intrínseca à combustão dos resíduos. Fica explicitado com os números como o Japão se sobressai nessa questão de quantidades de usinas, assim como, a porcentagem delas que possuem geração de energia (1893 usinas, sendo que 79% delas possui geração de energia elétrica) e, também, como outros países, Suíça, Dinamarca e Suécia, se destacam por possuírem grande porcentagem das usinas com geração de energia elétrica, apesar de não terem muitas unidades em operação. A preocupação com o tratamento térmico de RSU desses países pode ser compreendida por serem países com invernos mais rigorosos, sendo que grande parte do aproveitamento energético dessas usinas gira em torno de sistemas de calefação para aquecimento das cidades, ao mesmo tempo que geram energia elétrica, caso a usina tenha essa característica. Além disso, há também a questão da escassez de terra para disposição em aterros, que é o caso do Japão, que é uma ilha, e a Suíça, que tem um território muito limitado.

Dessa forma, a geração de energia elétrica por meio do tratamento dos resíduos sólidos urbanos ataca diretamente essas duas questões, às quais são essenciais atualmente, lidando com o destino correto dos resíduos, e não permitindo que eles contaminem o meio ambiente, assim como contribuindo para a diversificação da matriz energética, sendo uma fonte alternativa e sustentável de geração de energia elétrica e ecologicamente responsável, ainda com participação mínima na matriz energética.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções seguintes estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

1.1.1 Objetivo Geral

Objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo das técnicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos, destringindo suas características e processos intrínsecos, assim como, ressaltando aspectos positivos e negativos relacionados à cada técnica de processamento. Tem como objetivo, também, buscar bases de dados para demonstrar como a questão da destinação correta dos resíduos sólidos urbanos são importantes não só para a sociedade, mas também para o meio ambiente, à curto, médio e longo prazo. Serão estudados e analisados normas e políticas públicas, compreendendo com é regulamentada essa questão e comparando com o que acontece na prática. Visa conectar o tratamento de resíduos sólidos urbanos com o potencial de geração elétrica de cada tecnologia, estudando suas especificidades.

1.1.2 Objetivos Específicos

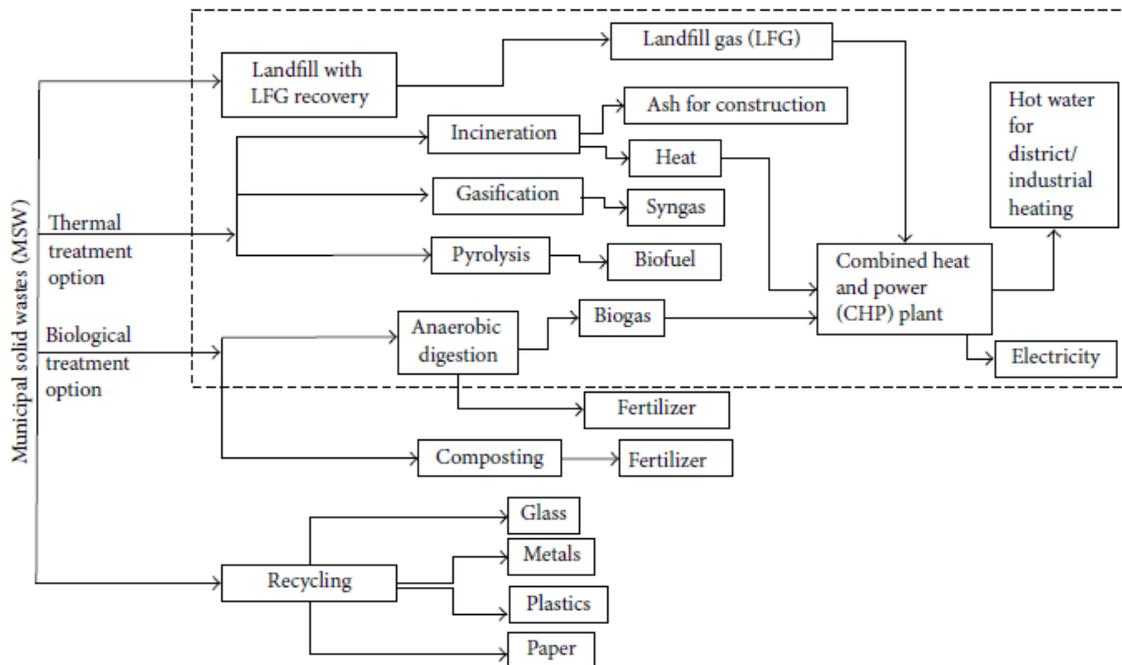
Em relação aos objetivos específicos, tem-se o embasamento e aprofundamento dos conhecimentos relacionados ao tratamento de resíduos sólidos urbanos para que assim, juntamente com o estudo de normas e de dados, possa se fazer uma análise crítica da situação do país em busca de soluções mais palpáveis e viáveis para o Brasil. Outro objetivo é abranger estudos atuais, trazendo conhecimentos sobre essas tecnologia e sobre o que tem sido estudado e discutido recentemente no mundo acadêmico. E, a partir de toda essa exposição, discutir caminhos e soluções que variam dependendo do grau de comprometimento do governo e das empresas e da sociedade visando incorporar a logística reversa na sociedade de consumo brasileira, não só prevenindo danos ambientais e futuros problemas devido ao acúmulo de resíduos urbanos, como gerando renda a partir da produção de energia e diversificando a matriz energética sustentável brasileira.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Ao redor do mundo, para garantir o manejo sustentável dos resíduos sólidos urbanos (RSU), há quatro derivações de solução para o tratamento de RSU, o tratamento térmico, o tratamento biológico, aterros sanitários com recuperação energética e a reciclagem. E entre elas, o tratamento térmico, o tratamento biológico e os aterros sanitários com recuperação energética são baseados no tema de recuperação energética, opção para a hierarquia de tratamento de RSU (Islam, 2016). Ou seja, essas quatro são as formas de se tratar RSU de maneira sustentável, sendo que apenas três delas envolvem a recuperação energética direta. O tratamento térmico é dividido em quatro possibilidades de tratamento operando atualmente: incineração (*mass burn*), pirólise, gaseificação e usinas com arco de plasma. O tratamento biológico é dividido entre digestão anaeróbia e compostagem. Apenas a reciclagem e a compostagem não possuem recuperação energética, não geram eletricidade, porém são destinações sustentáveis para os resíduos como indica o tracejado da Figura 2 a seguir.

Figura 2 - Fluxograma dos tipos de tratamento de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: Islam, 2016

O tratamento térmico de RSU se utiliza do poder calorífico dos materiais contidos nos resíduos para a partir dessa geração de calor, aquecer um reservatório de água para a geração de vapor, sendo o vapor canalizado por uma tubulação para obter maior pressão e girar uma turbina conectada a um gerador elétrico. Esse ciclo é conhecido como ciclo de Rankine e será melhor detalhado nas próximas seções. Existem quatro formas de tratamento térmico, as quais são: a incineração (conhecida como *mass burn* ou queima em massa), a pirólise, a gaseificação e a tecnologia de arco de plasma. As três primeiras formas de tratamento têm tecnologias consolidadas e anos de estudo e experiências em diversos países, enquanto a tecnologia de arco de plasma é recente e se tem poucos estudos sobre essa forma de tratamento, possuindo apenas duas fábricas de tratamento de RSU com essa tecnologia no mundo, localizadas no Japão.

O tratamento biológico, por sua vez, ocorre fundamentalmente devido à presença de microrganismos que ajudam a acelerar o processo de decomposição dos resíduos orgânicos, sendo que pode ser ou não implementada a recuperação energética. O tratamento biológico sem recuperação energética é conhecido como compostagem, utilizando resíduos sólidos orgânicos, matéria seca (palha ou folhas secas) e oxigênio para se obter, após um tempo de maturação, um fertilizante para o solo e para as plantas. Já o tratamento biológico com a recuperação energética ocorre sem a presença de oxigênio e em um ambiente hermeticamente fechado, pois o aproveitamento energético ocorre pela extração dos gases, principalmente o metano, produzidos pela decomposição dos RSU. E, após a extração do biogás, ele é purificado por um sistema de filtragem e utilizado como combustível para um motor conectado a um gerador para, assim, gerar eletricidade.

Outra opção são os aterros sanitários com recuperação energética, que é semelhante ao tratamento biológico anaeróbio, tendo os mesmos objetivo, obter o biogás a partir da decomposição dos resíduos existentes no aterro sanitário. A diferença é que no aterro não há uma separação criteriosa dos resíduos, podendo conter matéria inorgânica na composição, porém, mesmo assim, o aterro sanitário pode ser adaptado para canalizar esses gases que, além de serem queimados para a geração de calor e energia, são gases altamente poluentes, contribuindo para o efeito estufa, ou seja, essa extração do biogás tem também uma contrapartida ambiental positiva. Os benefícios do aproveitamento do gás gerado no aterro sanitário como fonte energética foram a solução para o problema do acúmulo e dos vazamentos de gás nos aterros, que frequentemente ofereciam risco de explosões (Engebio,2014).

E por último, tem-se a reciclagem, que é uma forma de manejo sustentável dos resíduos os quais têm possibilidade de ser recicláveis, como vidro, metal, papel e alguns tipos de plásticos. No entanto, não possuem recuperação energética direta. A produção de vidro requer uma grande quantidade de energia e água. Assim, reciclar o vidro é, de certa forma, não incentivar sua produção e o aumento da sua produção e, por consequência, diminuir o gasto energético e de recursos hídricos para a produção de mais vidros. Essa lógica pode ser utilizada por outros materiais também, como o metal, que demandam energia para sua produção. Assim, a reciclagem, apesar de não ter recuperação energética direta, tem uma forte correlação com a questão energética e hídrica, além da questão de diminuir a poluição física do ambiente, por serem materiais com um tempo de decomposição muito longo.

As principais vantagens da recuperação de energia são a redução do volume dos materiais, a geração de resíduos inertes, os benefícios financeiros obtidos a partir dos resíduos, o desvio de fluxo de resíduos biodegradáveis e o modo prático de gerenciar o aumento da geração de resíduos (Engebio,2014). Há também questões e processos que envolvem o tratamento de resíduos que são totalmente intrínsecos e importantes para o tratamento dos RSU, os quais devem ser expostos e analisados.

Uma questão pertinente sobre o tema de geração de energia a partir de RSU é que a geração de energia é extremamente dependente da composição do RSU. E a composição do RSU, por sua vez, depende de uma série de fatores como, por exemplo, o hábito daquela região e da população, sua cultura e o grau de desenvolvimento relacionado ao poder aquisitivo daquela população. Estudos mostram que países com maior desenvolvimento possuem menor porcentagem do lixo em material orgânico e grande porcentagem do lixo em materiais inorgânicos, como plásticos, metais e vidros, em comparação com países em desenvolvimento, os quais possuem maior porcentagem de rejeitos em materiais orgânicos e uma parcela menor de materiais como plásticos, metal, vidro e madeira. Além disso, outra questão relevante, principalmente no tema de tratamento térmico de RSU, é em relação à quantidade de umidade contida nos materiais que compõem os rejeitos, sendo que materiais orgânicos possuem maior quantidade de umidade na composição se comparados aos plásticos, metais, vidros, entre outros. E cada material possui um potencial calorífico, ou seja, a quantidade de energia térmica que determinado material pode gerar com sua queima e, quanto maior a umidade contida naquele material, menor será o seu potencial calorífico. Dessa forma, quando é utilizado materiais com muita umidade para geração de energia, o rendimento da geração cai consideravelmente. O potencial calorífico é dividido em potencial

calorífico superior (PCS) e potencial calorífico inferior (PCI), sendo que o potencial calorífico superior não considera que a umidade contida no material evapora, enquanto o potencial calorífico inferior considera a evaporação da umidade contida no material. Para a evaporação da água é necessária energia e, por isso, o potencial calorífico superior é sempre maior que o potencial calorífico inferior. O PCI de alguns materiais encontrados nos resíduos sólidos urbanos é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Potencial Calorífico Inferior encontrados em RSU.

Material	Kcal/kg
Plástico	6.300
Borracha	6.780
Couro	3.630
Têxteis	3.480
Madeira	2.520
Alimentos	1.310
Papel	4.030

Fonte: EPE, E.D.P.E. Aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande. Rio de Janeiro, 2008.

Portanto, pensando no rendimento de uma usina térmica com geração a partir de RSU e também no tratamento dos RSU, é essencial uma triagem e separação dos materiais antes da incineração ou outra forma de tratamento térmico, para que materiais com muita umidade possam passar por uma secagem, de forma a ser melhor aproveitado o resíduo, assim como, utilizar da triagem e separação para retirar materiais recicláveis como vidros e metais, os quais não são indicados para queima, destinando corretamente esses materiais.

2.1.1 Normas

As principais normas que regularizam e definem, como por exemplo, a periculosidade de resíduos, assim como seu destino, são as normas da ABNT 10.004 e a 8.419. Outra regulamentação importante ocorreu também com a lei pública 13.305/2014 Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual descreve conceitos, medidas, ações responsáveis por tornar a destinação de resíduos sólidos urbanos no Brasil mais sustentável. Não cabe neste trabalho detalhar as normas e explicitá-las, valendo o mesmo para a lei criada em 2014. Mas vale ressaltar algumas questões. Uma questão válida que a norma ressalta é que existe uma separação dos tipos de resíduos e suas classificações e, a partir disso, é feita uma

destinação mais correta para cada tipo de resíduo. Essa classificação é muito necessária, pois há alguns resíduos com alto nível de periculosidade e/ou que não podem se misturar com os resíduos comuns e não podem ter um destino inadequado, podendo causar danos às pessoas, que manejam o resíduo ou ao ambiente em que foram depositados. Há também uma parte da norma destinada a especificar as características dos aterros e os tipos de resíduos que podem ser colocados ali, prezando pela segurança de quem trabalha no aterro, assim como da população que vive naquela região, ao mesmo tempo que visa diminuir os impactos ambientais causados pelos aterros.

Sobre a política pública de 2010, ela foi um grande avanço para o país como um todo, pois regularizou e clareou uma perspectiva mais ecológica e sistêmica sobre a questão de gestão de resíduos sólidos urbanos. Entre algumas das definições importantes elucidadas pela lei, estão a definição de logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A logística reversa consiste de um conjunto de ações, medidas e meios para resgatar os resíduos e retorna los ao setor produtivo para que esses resíduos possam ser reutilizados ou reciclados por estas empresas, buscando reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros, preocupando-se com todo o ciclo de vida do produto, principalmente após o seu descarte. A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos tem uma semelhança com a logística reversa, porém vai um pouco além ao descrever que a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos devem ser compartilhada pelo estado, fabricantes, comerciantes, importadores, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com o objetivo de diminuir o volume de resíduos sólidos urbanos, assim como, reduzir o impacto à saúde humana e ao meio ambiente. Ou seja, é definida como uma responsabilidade de todos os setores da sociedade se preocupar com o ciclo de vida completo dos produtos consumidos ou vendidos, o que em si é algo muito positivo, ao se pensar que, ao longo da história, era comum a ausência da responsabilidade acerca da destinação dos resíduos por parte das empresas que produziam os produtos e dos consumidores, sendo uma preocupação exclusiva dos governos.

Outro ponto que caracteriza o progresso na gestão de resíduos é a regularização das formas de geração de energia elétrica por meio de RSU, desde que comprovada a sua viabilidade técnica e ambiental, tendo que ser implementada em conjunto um programa de monitoramento de gases tóxicos, aprovado pelo órgão ambiental. A lei, como um todo, é muito positiva para o evolução da gestão de resíduos no Brasil. Entretanto, faz mais de sete anos que essa lei foi aprovada e pouco tem sido feito para realmente resolver a questão de

resíduos sólidos urbanos no Brasil. Ainda há pouco incentivo, tanto público quanto privado, para a implementação de projetos de geração de energia elétrica por meio de RSU e, da mesma forma, tem sido feito pouco progresso no sentido de melhorar a coleta seletiva, a reciclagem e a reutilização dos resíduos sólidos urbanos, como será mostrado mais à frente, na parte dos dados. Ou seja, a lei 12.305 dá uma base de como e o que precisa ser feito, necessitando de um próximo passo mais contundente, com ação e fiscalização no sentido de uma gestão de resíduos mais integrada e ecológica. Como foi citado anteriormente, a separação dos tipos de resíduos de acordo com sua origem é fundamental e é descrita no Quadro 1.

Quadro 1- Classificação de resíduos segundo a origem.

a)	Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
b)	Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
c)	Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
d)	Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
e)	Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
f)	Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
g)	Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
h)	Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
i)	Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
j)	Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
k)	Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Fonte: Adaptado da lei 12.305 (Rollemberg, Francisco).

2.1.2 Tratamento Biológico de RSU

O tratamento biológico é o processo natural de decomposição dos resíduos orgânicos no qual é produzido o biogás, contendo principalmente o metano. O produto da compostagem é um adubo orgânico. A principal forma de processamento dos resíduos orgânicos em aterros é a digestão anaeróbia dos resíduos. Normalmente, o gás de aterro é composto por 55 por cento de metano, 40 por cento de dióxido de carbono e pequenas quantidades de nitrogênio, hidrogênio e água (Engebio, 2017). Esses gases podem ser coletados com o auxílio de uma rede de tubos horizontais e poços, que são instalados anteriormente e durante a deposição dos resíduos no local do aterro (Engebio,2017).

“A decomposição anaeróbia vem sendo utilizada extensivamente para o tratamento dos resíduos agrícolas e provenientes de esgotos. O seu uso no tratamento de RSU, normalmente nos resíduos de esgoto, produz um combustível que pode ser utilizado - como é o caso do aterro - para alimentar incineradores, na geração de eletricidade ou, após ser purificado, para ser adicionado ao suprimento de gás. Uma grande vantagem da digestão anaeróbia é que todo o gás produzido pode ser coletado e utilizado, ao contrário do gás de aterro, cuja eficiência na coleta é relativamente baixa (50 por cento ou menos). A digestão anaeróbia também produz um resíduo sólido ou “digestato”, que pode ser tratado como fertilizante” (Engebio, 2017). Como explicitado na citação, o processamento de esgoto de forma anaeróbia permite a recuperação de gás para geração de eletricidade e para utilização como fonte de gás, combustão, mas não é o caso em aterros sanitários, pois a recuperação de gás não é comum, visto que, para a recuperação do gás, é necessário planejamento e infraestrutura adequada para implementação.

Além disso, há estudos recentes sobre algumas variâncias no processo de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos que possuem diferentes características, vantagens e desvantagens. As tecnologias de digestão anaeróbia podem ser divididas em: úmida (*Wet*), ideal para poucos sólidos, e seca (*Dry*), ideal para muitos sólidos. E também possuem duas temperaturas de operação: Mesofílica (35-40 °C) e Termofílica (55-60 °C). A Tabela 5 especifica as características de cada tecnologia para as duas diferentes temperaturas de operação.

Tabela 4 – Tecnologias de digestão anaeróbica.

Tecnologias de digestão anaeróbica	Temperatura de operação	Vantagens	Desvantagens
Úmida (poucos sólidos)	Mesofílica (35-40 °C)	Usado em aterros; Alta taxa de retorno interno; Métodos de pré-tratamento do resíduo para melhorar a eficiência do processo do biogás; Baixo nível de produção de chorume; Baixa temperatura de operação; Operação estável.	Baixa difusão da tecnologia; Pouco investimento em infraestrutura; Pouco subsídio do governo; Grandes períodos para o processamento.
Úmida (poucos sólidos)	Termofílica (55-60°C)	Produção de hidrogênio e metano; Alta taxa de processamento de orgânicos; Baixos custos operacionais e de manutenção; Aumento na produção de biogás; Resistência à espumação.	Menos estável-problemas de instabilidade; Alta concentração de ácido voláteis; Número limitado de digestores.
Seca (muitos sólidos)	Mesofílica (35-40 °C)	Menor acumulação de ácidos voláteis; Menor taxa de proliferação de microrganismos específicos; Maior taxa de remoção de matéria orgânica.	Menor redução de celulose e hemicelulose; Maior tempo de operação para obtenção de metano e matéria orgânica; Degradação em 40 dias.
Seca (muitos sólidos)	Termofílica (55-60°C)	Maior redução de celulose e hemicelulose; Períodos curtos de operação para obtenção de metano e matéria orgânica (20 dias); Alto coeficiente de produção de metano; Inibido devido à amônia	Acumulação de ácidos graxos; Alta taxa de proliferação de microrganismos específicos.

com taxa de carga orgânica.

Fonte: Resíduos sólidos municipais como uma valiosa fonte de energia sustentável: Uma oportunidade ao redor do mundo de recuperar energia a partir das Tecnologias de Energia com resíduos sólidos urbanos. (2017).

Há também questões ambientais e econômicas as quais estão relacionadas às tecnologias de digestão anaeróbia. Em relação à tecnologia com estágio úmido, há algumas vantagens e desvantagens adicionais descritas na tese de Mestrado da Raquel Marques (2004). A diluição dos resíduos sólidos traz a vantagem econômica de que equipamentos mais baratos podem ser usados para condução desses resíduos, por exemplo, bombas e tubulações, quando comparado com o custo de deslocamento de materiais sólidos. Essa vantagem é, porém, equilibrada pelos custos de investimento mais altos, que resultam em reatores maiores com misturador interno, equipamento de secagem maior e etapas de pré-tratamento. De maneira geral, custos de investimento são comparáveis com o sistema seco de um estágio. Uma desvantagem ecológica é a recuperação incompleta do gás devido à remoção de fermentáveis com a camada de espuma flutuante e a fração pesada. Outro ponto é o consumo relativamente alto de água (aproximadamente 1 m³ de água por tonelada de resíduo). O consumo de água é frequentemente um fator decisivo no processo de seleção de um projeto de reator em projetos de larga escala, porque o consumo de água mais alto, à parte de considerações ecológicas, incorre em custos financeiros mais elevados para a compra da água, tratamento antes da disposição final e taxas de descarga. O aumento de volume dos resíduos devido à diluição com água resulta em aumento paralelo de consumo de vapor para aquecer o volume do reator. Esta exigência de energia adicional não quer dizer exatamente um consumo interno maior de biogás produzido, porque o vapor é normalmente recuperado da água de refrigeração das máquinas de gás e gases exaustos. Há casos onde o vapor produzido é exportado para fábricas nas proximidades, porém o rendimento será mais baixo (Marques, Rachel 2004).

Há também algumas vantagens e desvantagens adicionais descritas em Marques (2004) em relação à tecnologia seca, ao mesmo tempo que finaliza a descrição sobre ambas tecnologias, digestão anaeróbia com estágio seco e com estágio úmido.

As diferenças entre secos e úmidos são pequenas em termos de investimento e custo de operação. O alto custo para um robusto projeto de tratamento de resíduos, tais como bombas, roscas e válvulas requeridas para o sistema seco, são compensadas por um pré-

tratamento e reator mais baratos, sendo o reator muito menos dispendioso economicamente que aquele para o sistema úmido. A pequena quantidade de calor requerida para o sistema seco normalmente não ultrapassa o ganho final, uma vez que o calor em excesso dos motores a gás é raramente vendido às indústrias vizinhas. No caso do sistema úmido, 30% da energia produzida é consumida na planta (Verstraete, 2002).

Outra possibilidade de tratamento biológico de RSU que foi citada, utilizando alguma das tecnologias de tratamento biológico apresentada, é o tratamento em aterros sanitários com recuperação de gás. Esse tipo de tratamento usaria como matéria prima de geração de gás apenas a parcela orgânica dos resíduos. Outros materiais como plástico, metal, vidro, entre outros, teriam que ser encaminhados para um destino melhor, como a reciclagem ou incineração. Da mesma forma que as tecnologias de tratamento biológico, o tratamento em aterros visaria a produção de gás pois, por meio de um tratamento de purificação do gás, conhecido como GDL (gás de lixo), permitiria que, com sua combustão, fosse gerada energia elétrica. Essa energia elétrica, por sua vez, seria em parte utilizada na estação de tratamento e parte seria vendida à concessionária de energia, como fonte de receita para a estação de tratamento.

A implementação de aterros sanitários com tratamento biológico dos RSU com recuperação de GDL possui apenas vantagens para o meio ambiente e para a população ao redor do aterro. Entre elas, pode-se citar a contenção do gás, diminuindo a possibilidade de riscos de explosão, devido ao alto poder de combustão do gás; e diminuição do odor forte dos aterros; diminuição da proliferação de animais, pois o resíduo orgânico, que geralmente é o conteúdo que mais atrai ratos e outros animais, estará confinado em um reator; redução os impactos do metano na camada de ozônio. Porém, há um problema na utilização desse gás que, mesmo com processos de purificação, ainda são gases corrosivos quando incinerados, danificando por exemplo, a estrutura interna do motor à combustão.

A questão fundamental para a análise e modelagem dos aterros sanitários com recuperação de gás gira em torno do gás. Logo, para compreender a viabilidade de um projeto de um aterro sanitário com recuperação de gás, é necessário mensurar o quanto de gás pode ser gerado, numa previsão por meio de dados estatísticos, para se estimar o quanto de resíduo pode ser captado e processado e quanto de gás pode ser produzido com essa quantidade de resíduo. Assim, a partir de uma estimativa da produção de gás, chega-se à quantidade de energia que pode ser produzida com essa quantidade de gás. Com isso, calcula-se quanto da energia será usada para abastecer a estação, subtrai se do total, e se encontra a energia que será vendida, sendo a receita. Por fim, se analisa os custos iniciais, custos de operação e a

receita para se ter uma ideia concreta da viabilidade da operação econômica do projeto. Essa seria uma forma simples e muito sintetizada da ideia de modelar e mensurar a viabilidade de um projeto de aterro sanitário com recuperação de gás. Contudo, há alguns autores de artigos, brasileiros inclusive, que descrevem mais detalhadamente sobre como abordar esse tema e como se modelar esses problemas. A geração elétrica usando gás de aterro sanitário nos motores depende, sobretudo, da eficiência do sistema. A eficiência varia de acordo com o tipo de motor e a carga da operação. A produção elétrica pode ser calculada por (1) (Souza, Samuel, 2014):

$$E = LHV \times \eta \times CON_{ch4} \quad (1)$$

Em (1), LHV é a produção de metano (KWh /m³; η é a eficiência do motor e alternador com combustão interna do gás; e CON_{ch4} é o consumo anual de biometano (m³/y). Biometano pode ser produzido pelo GDL (gás de lixo) e pelo biogás gerado de digestão anaeróbia de resíduos biodegradáveis em reatores industriais (Souza, Samuel, 2014).

Uma fórmula de primeira ordem com decaimento que modela a produção do GDL de um aterro controlado/célula de despejo, sendo usada vastamente nesses anos recentes, é mostrada em (2) (Isabel e, Maria, 2016).

$$Q = L_o \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (2)$$

Onde:

Q = geração de metano do ano em questão (m³/ano)

L_o = potencial de geração de metano (m³/Mg)

R = média anual de aceitação de resíduos ao longo do tempo de operação (Mg/ano)

k = constante da taxa de geração de metano (1/ano)

c = tempo desde o fechamento da célula de despejo (ano)

t = tempo desde a abertura da célula de despejo (ano)

De acordo com informações fornecidas pela Abrelpe, baseado em dados do ano de 2012, há dois projetos de aterros com produção de metano e de energia elétrica no Brasil os quais são, o Aterro de Bandeirantes (São Paulo), gerando 755.700 MWh, e o aterro de São João (São Paulo), com 476.900 MWh, totalizando 1,2 milhões de MWh. A mesma pesquisa feita pela ABRELPE identificou outro aterro com produção de gás e geração de energia elétrica, em Salvador (Bahia) mas, nesse caso, não houve dados disponíveis na data de início das operações ou mesmo da geração (Isabel e, Maria, 2016).

Em relação à capacidade do biogás de aterros para geração de eletricidade, considerando a energia potencial, o biogás apresenta de 22.500 a 25.000 kJ/m³ de valor de aquecimento, enquanto que o metano apresenta em torno de 35.800 kJ/m³ (Isabel e, Maria, 2016).

A digestão anaeróbia para RSU é amplamente usada em todo o mundo e tem uma eficiência de 35% na conversão de energia térmica para energia elétrica (LOBÃO *et al*,2008).

2.1.3 Tratamento Térmico de RSU

2.1.3.1 Incineração

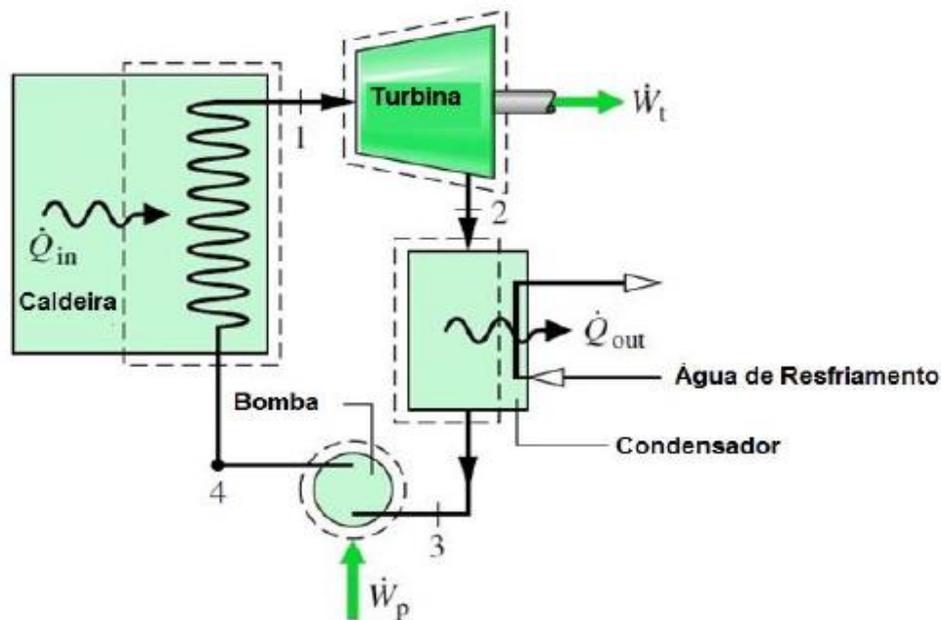
O tratamento térmico conhecido como incineração é o mais comum entre os tratamentos de RSU, por ser o mais antigo e o mais difundido entre as tecnologias de tratamento térmico. Antigamente, era usada a incineração apenas para a redução do volume dos resíduos, sem preocupação com os gases emitidos pela queima, não se conhecia aplicações para as cinzas do produto da queima e não havia produção de energia elétrica. Após estudos verificarem que existia emissão de gases tóxicos e metais pesados, muitas usinas de incineração fecharam com a regulamentação das quantidades permitidas dessas substâncias emitidas, principalmente dioxinas e furanos, substâncias com alto efeito carcinogênico. Porém, hoje, com um tratamento adequado da fumaça, com uma série de etapas como o precipitador eletrostático, filtros de manga, e por último, o lavador de gases, se conseguiu obter níveis de substâncias tóxicas abaixo do nível permitido, sendo, portanto, uma alternativa segura e viável para o tratamento de resíduos sólidos urbanos.

A incineração em si é o processo de queima direta do resíduo que opera entre 750 °C e 1000°C, extraindo dele o poder calorífico contido para que esse calor gerado possa ser usado como fonte de geração de energia elétrica. O processo usado para a geração de energia é conhecido como ciclo de Rankine, no qual o calor gerado pela queima dos resíduos é utilizado para esquentar uma caldeira com água para a geração de vapor. Esse vapor, com o aumento sua pressão e velocidade, é canalizado para uma turbina que está conectada à um gerador elétrico, o qual produz a energia que será consumida ou vendida para a concessionária de energia elétrica.

O ciclo pelo o qual é extraída a energia da queima de resíduos sólidos, pelo ciclo de Rankine, é mostrado na Figura 3. Envolve as seguintes etapas. A energia térmica gerada pela queima é direcionada para a caldeira, na qual passa um encanamento com água bombeada do condensador, reservatório de água fria. Após passar pela caldeira, a água se transforma em

vapor e há um aumento de pressão. O vapor é direcionado para uma turbina, na qual a energia cinética da turbina é transformada em energia elétrica por um gerador conectado à turbina.

Figura 3- Diagrama simplificado do ciclo de Rankine, método pelo qual se gera eletricidade a partir de energia térmica



Fonte: MORAN, SHAPIRO (2006).

O calor gerado depende do poder calorífico dos materiais contidos nos resíduos e, por isso, que é necessária uma certa separação de materiais para otimizar o processo, melhorando o rendimento da usina pois, como foi dito anteriormente, os RSU contém um grande diversidade de materiais, mas principalmente orgânicos, e a umidade dos materiais dificulta o processo de incineração, assim como certos materiais específicos não são próprios para a queima, como por exemplo, materiais recicláveis como os vidros e os metais. Para diminuir a umidade dos resíduos e aumentar o rendimento da usina, foi criado um sistema que insere o ar quente gerado na queima por baixo da grelha, para secá-los e facilitar a queima. A respeito das cinzas, produto da queima, descobriu-se sua utilidade na área da construção civil, podendo ser incorporada à produção de asfalto, entre outras aplicações na área civil e marítima.

Nos Estados Unidos, há um crescente interesse em aplicações marítimas, como na prevenção de erosão de áreas costeiras e construção de recifes artificiais. Na Alemanha, metade das cinzas que vão para o fundo do incinerador (resíduo da queima) é usada como

material na construção de estradas e fabricação de barreiras à prova de som. Na Holanda, pretende-se usar 80 por cento de todos os subprodutos do incinerador de RSM. Atualmente, 40 por cento das cinzas captadas pelo equipamento de controle de poluição são usados como agregado para o asfalto. Cerca de 60 por cento das cinzas do fundo dos incineradores (mais de dois milhões de toneladas por ano) já são utilizadas como base para estradas, aterros e como agregado para concreto. Na Dinamarca, as cinzas do fundo vêm sendo utilizadas desde 1974. Quase três quartos (72 por cento) são usados como sub-base em estacionamentos, ciclovias e estradas (KOMPAC & KOGENERGY, 2005, p.4).

Para se ter uma noção quantitativa da capacidade de geração, volume de resíduos tratados, assim como, a capacidade de atendimento da demanda energética de uma usina de geração elétrica por meio de resíduos sólidos, segue uma citação a qual bem explicita esses parâmetros. Cerca de 100.000 toneladas/ano de resíduo sólido urbano são suficientes para garantir uma geração média de até 7 MWh, dependendo do poder calorífico do resíduo incinerado, suficientes para atender cerca de 10.000 domicílios de padrão de classe média (Engebio, 2017).

O tratamento de incineração exige alguns tipos modelos e sistemas de usinas com certas especificidades, podendo ser divididas entre sistemas de grelha, sistemas de leito fluidizado e sistema de queima em suspensão. Os sistemas de grelhas são os mais comuns, nos quais o material a ser incinerado é disposto em uma grelha horizontal ou com algum nível de inclinação, dependendo do projeto, e os gases exaustos da queima são reintroduzidos por debaixo das grelhas para ajudar na secagem dos resíduos e melhorar a incineração como um todo do processo. Na Figura 4, é mostrado um sistema com grelha, sendo que a grelha é o local onde o resíduo é despejado e incinerado e, depois, recolhido suas cinzas.

Figura 4 - Grelha Horizontal, onde ocorre a incineração dos RSU na usina termelétrica.



Fonte: Martin Gmbh (2009).

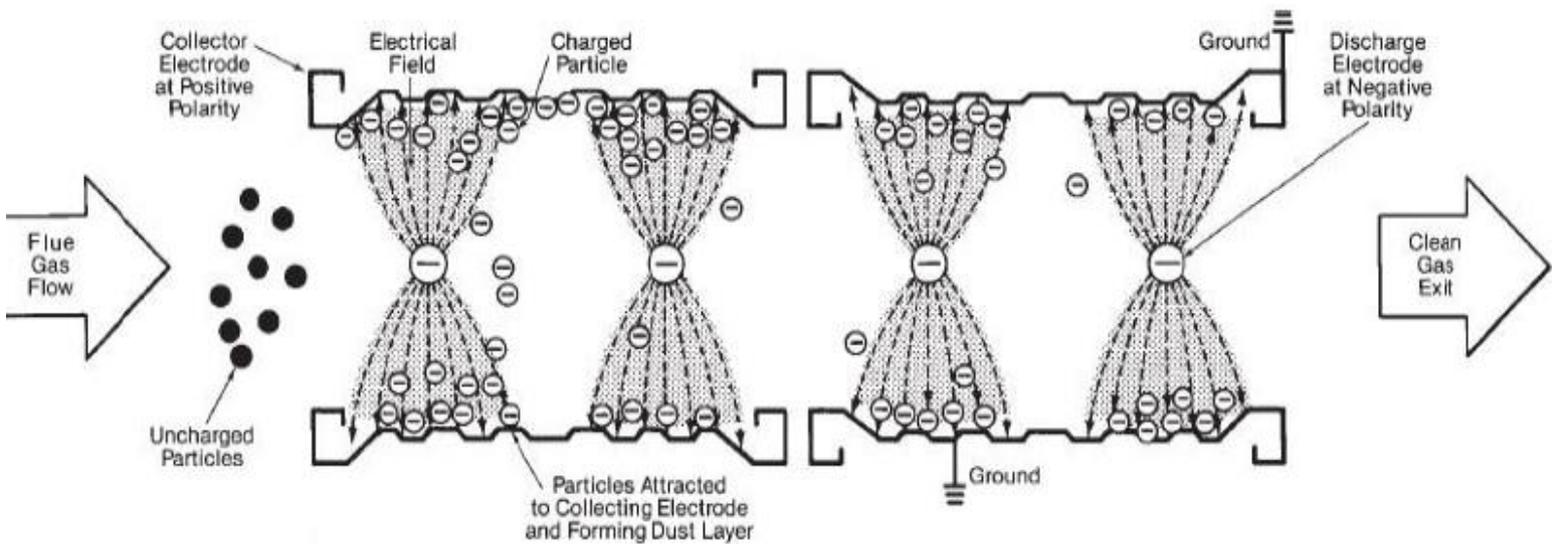
Os sistemas de leito fluidizado demandam que os resíduos sejam triturados, para que sejam incinerados juntamente com areia ou cinzas, com um insuflamento de ar ascendente para garantir uma forte movimentação do material em suspensão. É denominado leito fluidizado, pois o material em suspensão se assemelha a um fluido em ebulição.

Os sistemas de queima em suspensão constituem um caso muito específico de incineradores, pois eles são ideais apenas para materiais com baixo volume e massa e que possuem pouca porcentagem de água em sua composição. Estes incineradores, como o nome já diz, realizam a incineração dos resíduos ainda suspensos no ar, sendo depositados em uma certa altura, e sofrem a incineração enquanto caem e, por fim, são recolhidas as cinzas de fundo.

O sistema de lavagem de gases é composto por três etapas: o precipitador eletrostático, o filtro de manga e o lavador de gases. O precipitador eletrostático é um processo de filtragem do gás das usinas que utiliza um campo elétrico gerado por placas paralelas para ionizar as partículas sem carga e, com isso, atraí-las para as placas paralelas, ou seja, é utilizado um princípio físico elétrico para a filtragem de componentes mais pesados e tóxicos contidos no gás (Figura 5). Outro processo de filtragem utilizado é o filtro de manga, que é uma filtragem física do gás da usina, onde o gás forçado a passar por um tecido cilíndrico, deixando parte de suas impurezas. Após a passagem do gás pelo filtro de manga, é injetado no cilindro um pulso de ar para retirar as impurezas retidas no tecido (Figura 6). Por último, tem o lavador de gases, que também se utiliza de um processo físico, só que, ao invés

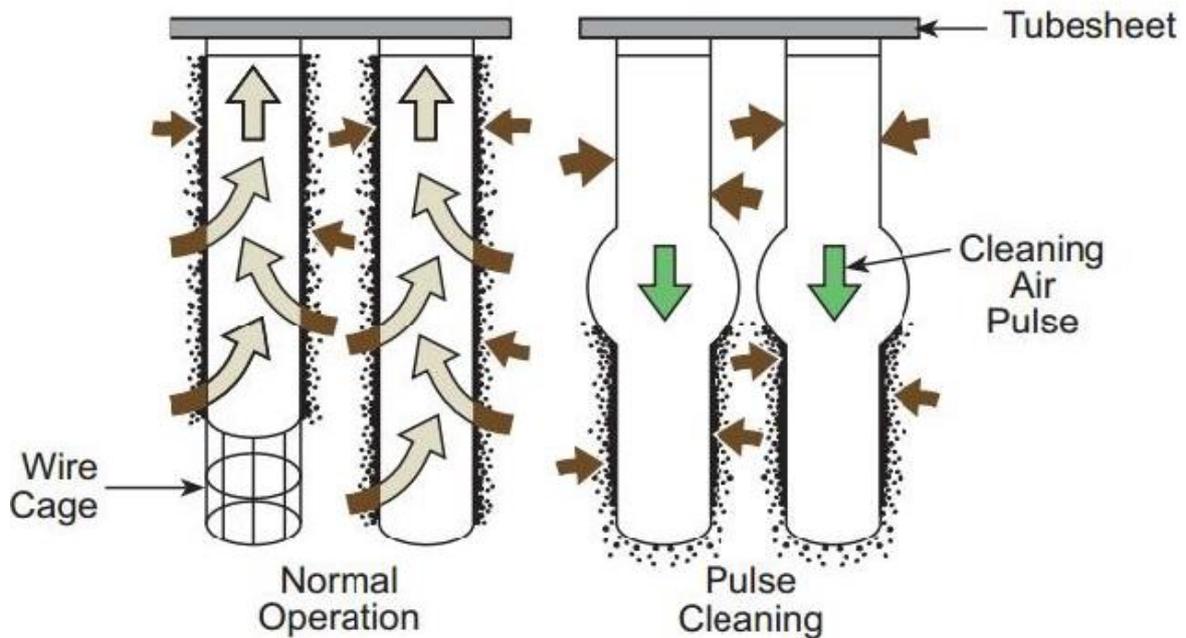
de um tecido para a filtragem, é utilizada a água como um filtro, no qual o gás é forçado a passar por um tanque de água, *sprays* e outros equipamentos que retêm as impurezas sólidas do gás. Depois a água é descartada (Figura 7).

Figura 5 - Funcionamento do Precipitador Eletrostático.



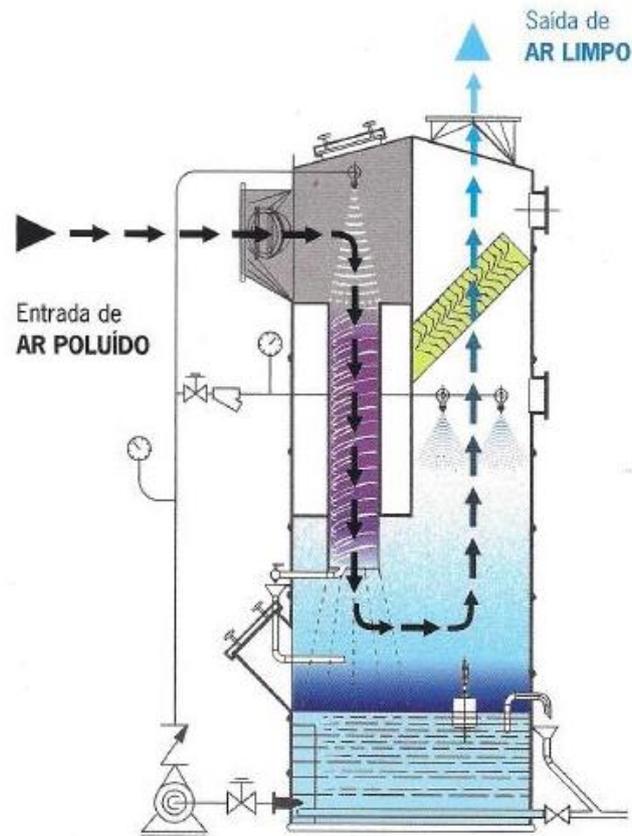
Fonte: Adaptado Babcock & Wilcox Company (2005).

Figura 6 - Funcionamento do Filtro de Manga.



Fonte: Babcock. Disponível em <<http://www.babcock.com/library/Documents/e1013199.pdf>> Acesso em 07/06/2021.

Figura 7 - Lavador de Gases.



Fonte: Disponível em <<https://www.belfano.com.br/lavadores-colunas-co2/lavador-depurador-gases-venturidro/>> Acesso em 07/06/2018.

Vantagens da incineração de RSU: reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, com geração de energia elétrica, por meio da produção de vapor, água quente/gelada com alta eficiência térmica; significativa redução da necessidade de área para a instalação de aterros novos ou de suas expansões; eliminação de impactos ambientais na criação de aterros novos ou expansão dos existentes; eliminação dos impactos e custos decorrentes das atividades de cuidado e manutenção de aterros pelo período de cinquenta anos após seu encerramento e lacração; eliminação total dos efeitos de contaminação de águas superficiais, lençóis freáticos e mananciais subterrâneos de água potável disponíveis; eliminação da emissão de gases pelos aterros, especialmente metano e dióxido de carbono (a emissão do metano tem efeitos 25 vezes mais prejudiciais que o dióxido de carbono); redução das distâncias percorrida pela frota de caminhões no transporte dos resíduos a aterros cada vez mais distantes, com a consequente redução dos impactos causados ao meio ambiente pelas emissões dos veículos, ao trânsito e às estradas; redução das despesas envolvidas em logística

da movimentação dos resíduos, direta ou indiretamente custeadas pelo erário; eliminação dos problemas de natureza social, de higiene e de saúde criados pela convivência da comunidade com os aterros, evitando a catação de alimentos/materiais, com a consequente eliminação dos custos sociais e hospitalares, também bancados pelo erário; melhor ocupação de espaços disponíveis para iniciativas mais nobres e adequadas à comunidade local (Lucke, 2012).

2.1.3.2 Pirólise

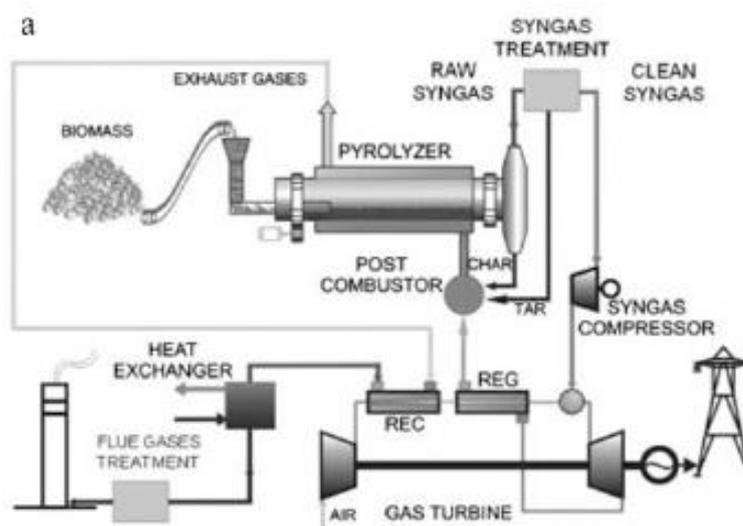
Esse tipo de tratamento térmico de RSU é semelhante ao processo de incineração, com a única diferença que, na câmara principal na qual os resíduos são tratados termicamente, não existe oxigênio e sua temperatura de operação é menor que a de uma usina de incineração comum. O processo é semelhante à incineração, quebrando as moléculas dos resíduos (*lise*) a partir do calor emitido para dentro da câmara (piro), porém a partir de um processo térmico anaeróbia. Após o processo de tratamento, são produzidas partes líquidas, sólidas e gasosas. As partes líquidas e sólidas são os rejeitos do processo, que podem ter aplicações de uso como citado anteriormente, compondo as cinzas de fundo do incinerador. A parte gasosa é aproveitada para geração de energia elétrica, após processo de limpeza do gás, purificando o de impurezas, a fim de melhorar seu desempenho na queima. Isso ocorre, pois o gás gerado no processo de pirólise, assim como na gaseificação, é um gás com alto potencial energético, e o foco de ambas as tecnologias de tratamento é a produção do gás, conhecido como *syngas*.

Pirólise é a degradação térmica dos resíduos sólidos em ausência de oxigênio. Fontes externas de calor são necessárias para manter a temperatura entre 300°C e 800°C, dependendo do material usado no processo. Nessa tecnologia, os resíduos precisam ser pré-tratados. Assim, é necessário a utilização de separação mecânica do vidro, metal e materiais inertes. Esse processo começa com a decomposição térmica dos resíduos orgânicos a uma temperatura de 300°C, com oxigênio reduzido ou livre de oxigênio, com câmaras de calor. Então, aumenta-se a temperatura para 800°C, com uma atmosfera não reativa. O bioproduto final da pirólise são gases, líquidos e sólidos residuais. *Syngas* é o gás produzido durante o processo de pirólise; é composto, principalmente, por metano, hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O valor da rede calorífica do *syngas* é normalmente entre 15 e 20 MJ/Nm³ (Moya e Diego, 2017).

Vantagens do processo de pirólise: o equipamento é flexível para a instalação; todos os resíduos são usados para produzir diferentes bio-produtos; o *syngas* pode ser usado em diferentes aplicações energéticas, como em motores, caldeiras, células combustíveis,

turbina e bombas de calor. Em resumo, o gás pode ser queimado para produzir energia e esses gases podem ser condensados para produzir biocombustíveis (Moya, Diego 2017). Uma representação de uma usina termelétrica com pirólise pode ser observado na Figura 8, com todos os seus processos: digestão dos resíduos na câmara de pirólise, tratamento e compressão do gás gerado, queima do gás produzido em motores a combustão, reguladores de calor e tratamento do gás emitido devido a combustão do *syngas*.

Figura 8 - Exemplo de Usina Térmica com Pirólise, com todos os seus processos fundamentais de funcionamento.



Fonte: Moya e Diego (2017).

2.1.3.3 Gaseificação

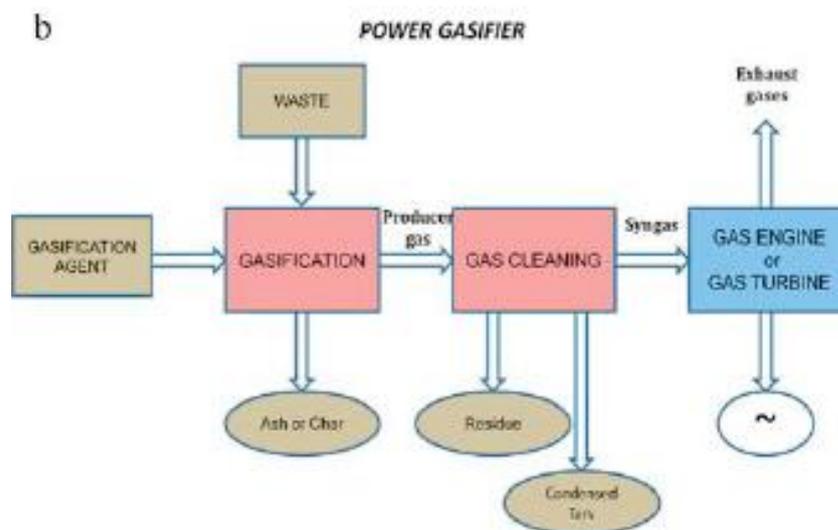
O tratamento térmico conhecido como gaseificação se assemelha muito ao processo de pirólise, no sentido de que ambas se focam e priorizam a geração de gás para a produção de energia elétrica, porém de maneiras distintas. A gaseificação, por sua vez, não ocorre na ausência de oxigênio, sendo a oxidação uma parte fundamental no processo de gaseificação. Outra diferenciação é que cada uma dessas tecnologias possui um alcance de temperaturas de operação diferentes, como será visto mais à frente.

O processo de gaseificação para a produção de energia a partir de resíduos sólidos foi desenvolvido há cerca de três décadas. Esse processo envolve a oxidação parcial e sua produção principal é o gás combustível. Gaseificação pode reduzir a massa do resíduo em 70% e cerca de 90% do volume dos resíduos. Um estudo recente indica que esse tratamento

térmico de resíduos é uma opção prática e viável para conversão energética de RSU, limitando a emissão de gases do efeito estufa e reduzindo as opções de disposição dos resíduos em aterros. Nesse processo, parte da energia é usada para a produção do calor para gaseificar o combustível remanescente (Moya e Diego, 2017).

As principais vantagens dessa tecnologia de tratamento de resíduos sólidos são: redução dos contaminantes orgânicos; redução da massa e do volume dos resíduos (80% e 90%, respectivamente); alto potencial para economia de terras; utilização de recicláveis; redução de emissão e de impactos ambientais; compatibilidade ambiental para cogeração (produção de calor e energia elétrica) como um recurso sustentável de resíduos; viabilidade técnica e econômica; alto alcance de temperaturas de operação (700 °C-900 °C) (Moya e Diego 2017). Um diagrama com os processos essenciais de uma usina termelétrica com gaseificação é exemplificado na Figura 9, sendo que os processos da gaseificação são exatamente os mesmos que a pirólise utiliza, porém com a diferença de que a gaseificação dos resíduos é feita com a presença de oxigênio.

Figura 9 - Esquemático de uma Usina Térmica com Gaseificação.



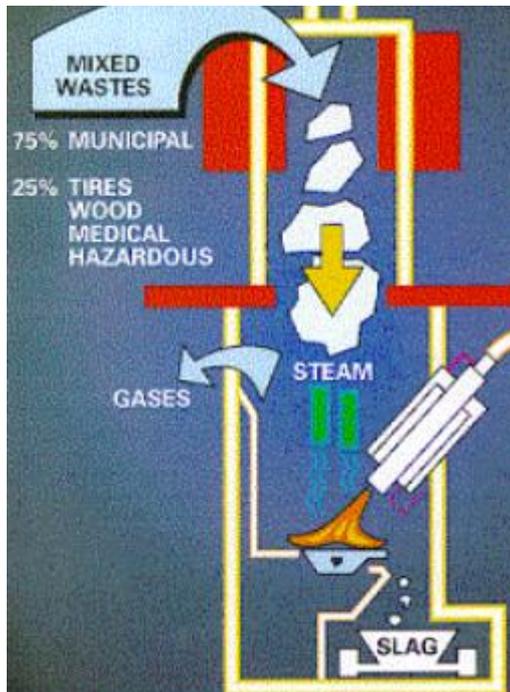
Fonte: Moya e Diego (2017).

2.1.3.4 Tecnologia de Arco de Plasma

A tecnologia de arco de plasma é a mais recente de todas as tecnologias de tratamento termoelétrico utilizando RSU como matéria prima, existindo apenas duas usinas com esse tipo de tecnologia em funcionamento no mundo, localizadas no Japão. O interior da caldeira e o gás atingem altas temperaturas, pois é devido a essa alta entropia causada por

altas temperaturas que se dissociam as partículas do gás em nível atômico, ionizando essas partículas. Ou seja, é criado um potencial elétrico, com um cátodo e um ânodo, gerando um faiscamento, um arco elétrico que conduzirá a energia elétrica e produzirá calor que vai induzir as partículas do gás a se dissociar, produzindo o plasma.

Figura 10 - Esquemático de uma Usina Térmica com Tecnologia de Arco de Plasma.



Fonte: Disponível em [CCI - Plasma Pirólise \(up.pt\)](http://CCI-Plasma Pirólise (up.pt)).

A tecnologia de arco de plasma, também conhecida como plasma pirólise, consiste em um processo de decomposição química por calor em ausência de oxigênio. Esta é uma tecnologia dedicada à destruição dos resíduos, que associa altas temperaturas geradas pelo plasma com pirólise dos resíduos. As propriedades do gás sofrem mudanças significativas quando este gás é submetido a temperaturas elevadas. Quando a temperatura de aquecimento atinge cerca de 2.000°C, as moléculas do gás começam a se dissociar em estado atômico. Quando atinge 3.000°C, os átomos são ionizados devido à perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma. O plasma é conhecido como o “quarto estado da matéria”: sólido, líquido, gasoso e plasma. É uma forma especial de material gasoso que conduz eletricidade. No estado de plasma, o gás atinge altas temperaturas, extremamente elevadas, variando de 5.000°C a 50.000°C, de acordo com as condições de geração. Tipicamente, as temperaturas do plasma são da ordem de 15.000°C. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado ao gás normal. O plasma é gerado pela formação de um arco elétrico pela passagem de corrente elétrica entre o cátodo e

o ânodo. Podem ser utilizadas tanto em corrente contínua, quanto em corrente alternada, mas até o momento a predominância é da utilização de corrente contínua. O plasma é gerado e controlado em tochas de plasma, que possuem o mesmo formato dos queimadores utilizados nos fornos. A tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia elétrica em calor transportado por um gás. As tochas podem ser de dois tipos: arco não transferido ou arco transferido. O arco é dito não transferido quando é produzido no interior do dispositivo de geração que contém os eletrodos e do qual sai o gás aquecido. Pode operar com corrente contínua ou alternada. As tochas de arco transferido utilizam um eletrodo emissor, estando o receptor do arco localizado fora da tocha, podendo ser outro eletrodo emissor ou o material sob aquecimento interligado ao circuito por meio de um eletrodo, essas tochas utilizam corrente contínua. A eficiência de transformação da tocha de plasma é da ordem de 85% a 90% da energia elétrica utilizada. [...] Os gases da queima são conduzidos para um reator de decomposição térmica a plasma, onde são totalmente decompostos, tendo ao final como constituintes, basicamente, hidrogênio e monóxido de carbono. A queima do resíduo é acompanhada da vitrificação do material inorgânico no fundo da fornalha. Na concepção deste processo nenhum produto resultante da queima pode deixar o sistema sem ser exposto a elevadas temperaturas, quer seja a escória vitrificada, quer sejam os gases da decomposição.[...] As principais vantagens de uso de plasma na decomposição térmica de substâncias são as elevadas temperaturas que causam rápida e completa pirólise da substância orgânica, permitindo fundir e vitrificar certos resíduos inorgânicos. Os resíduos/produtos vitrificados são similares a um mineral de alta dureza. O processo permite reduções de volume extremamente elevadas, podendo ser superiores a 99 %. O uso de plasma na decomposição térmica de substâncias é uma técnica delicada, exigindo um grande investimento. O volume de gases inicialmente gerado é mais baixo do que na combustão convencional, mas depois da combustão dos gases produzidos, a tecnologia de arco de plasma é idêntica às outras formas de incineração. Por fim, não dispensa um sofisticado sistema de lavagem de gases, tal como nos incineradores (Engebio, 2017).

Para efeito de comparação e referência sobre esta tecnologia pouco conhecida e pouco aprofundada, segue uma citação que traz números sobre o processamento de resíduos e sobre a produção energética de uma usina com arco e plasma no Japão.

A outra indústria de gaseificação por plasma fica em Utashinai, Japão. Também começou a processar RSU em 2002. O desenho original da aparelhagem determinou sua capacidade em torno de 170 toneladas por dia de RSU e de resíduos automotivos. Hoje, o aparelho processa aproximadamente 300 toneladas por dia. O aparelho gera mais de 7,9 MWh

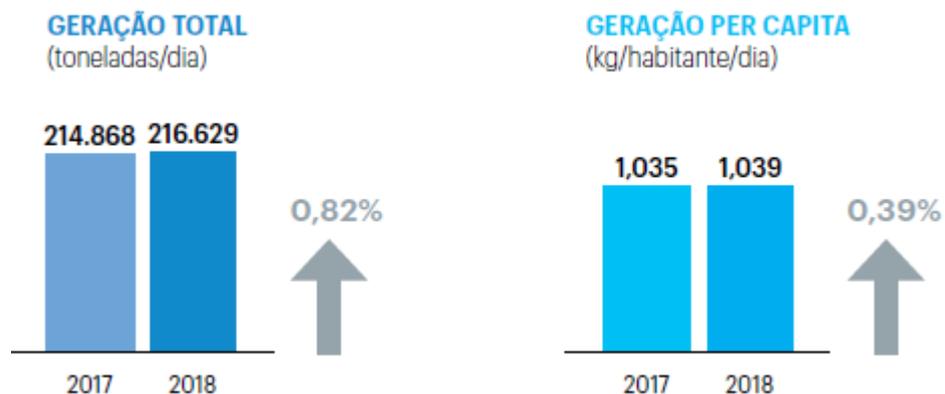
de eletricidade, enviando aproximadamente 4,3 MWh de volta à rede elétrica (Engebio, 2017).

2.1.4 Dados

Nessa seção do trabalho, serão apresentados alguns dados referentes à coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos fornecidos pela Abrelpe em 2018 e 2019 no Brasil.

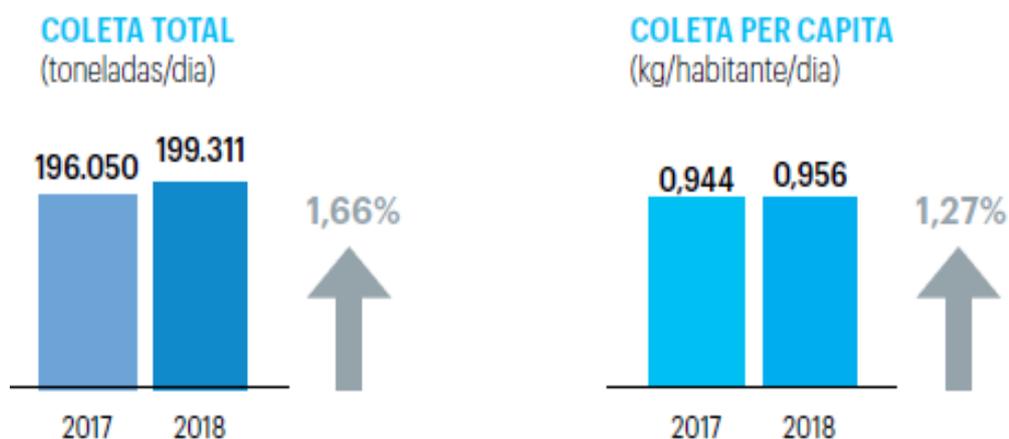
Os dados revelam que, em 2018, foram geradas 79 milhões de toneladas de RSU, um aumento de pouco menos de 1 % em relação ao ano anterior. Desse montante, 92 % (72,7 milhões) foram coletados. Por um lado, isso significa uma alta de 1,66 % em comparação a 2017, ou seja, a coleta aumentou num ritmo um pouco maior que a geração. Por outro, evidencia que 6,3 milhões de toneladas de resíduos foram recolhidos junto aos locais de geração. A destinação adequada em aterros sanitários recebeu 59,5 % dos resíduos sólidos urbanos coletados, 43,3 milhões de toneladas, um pequeno avanço em relação ao ano anterior. O restante (40,5 %) foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios. Ou seja, 29,5 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou aterros controlados, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações. Para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana no Brasil, os municípios aplicaram mensalmente, em média, R\$ 10,15 por habitante. Tais serviços empregaram diretamente, em vagas formais de trabalho, 332 mil pessoas no período - um recuo de 1,4 % em relação a 2017. O mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$28,1 bilhões no país, queda de 1,28 % na comparação com o ano anterior (Abrelpe, 2018-2019). Os números de 2018 e 2019 registrados pela Abrelpe são representados por gráficos e tabelas, conforme Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18 e também a Tabela 6, Tabela 7 e a Tabela 8, representando a geração de de RSU no Brasil e por região, a coleta de RSU no Brasil e por região, assim como, o índice de cobertura de coleta seletiva, a destinação dos resíduos gerados, além do que o custo para o tratamento dos resíduos e o custo por habitante no Brasil e por região, respectivamente.

Figura 11 - Geração de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 12 - Coleta de RSU no Brasil.



Fonte: Abrelpe/IBGE.

Tabela 5 - Quantidade de RSU coletada nas regiões e no Brasil.

Regiões	2017	População 2018	2018
	RSU Total (toneladas/dia)		RSU Total (toneladas/dia)
Norte	12.705	18.182.253	13.069
Nordeste	43.871	56.760.780	43.763
Centro-Oeste	14.406	16.085.885	14.941
Sudeste	103.741	87.711.946	105.977
Sul	21.327	29.754.036	21.561
BRASIL	196.050	208.494.900	199.311

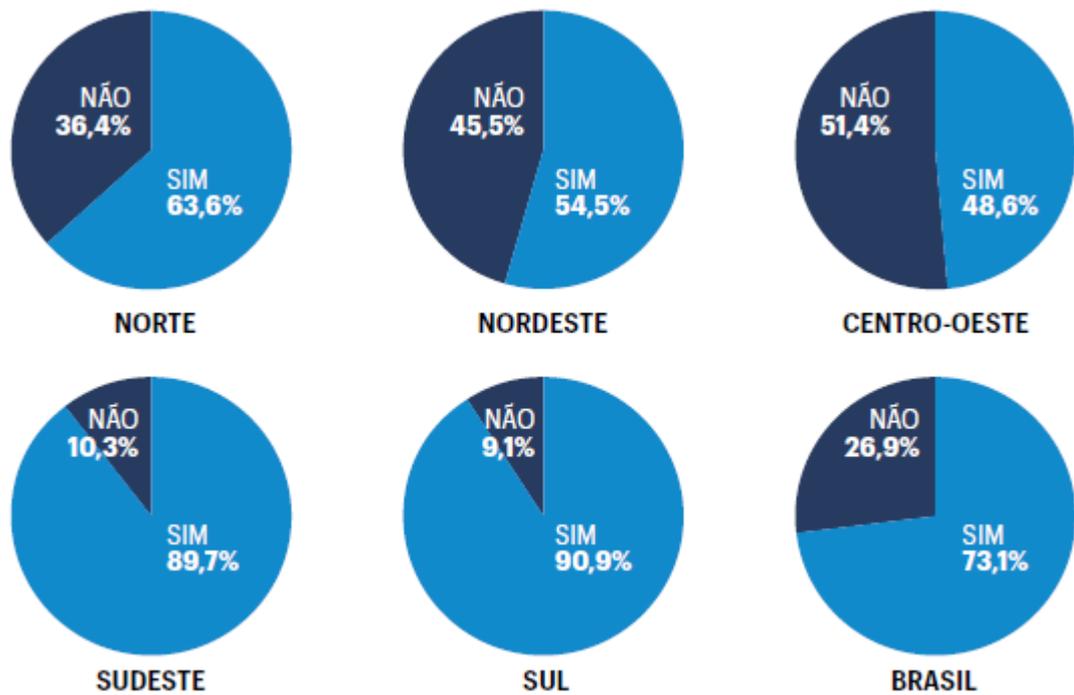
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 13 - Índice de cobertura da coleta e RSU (%).



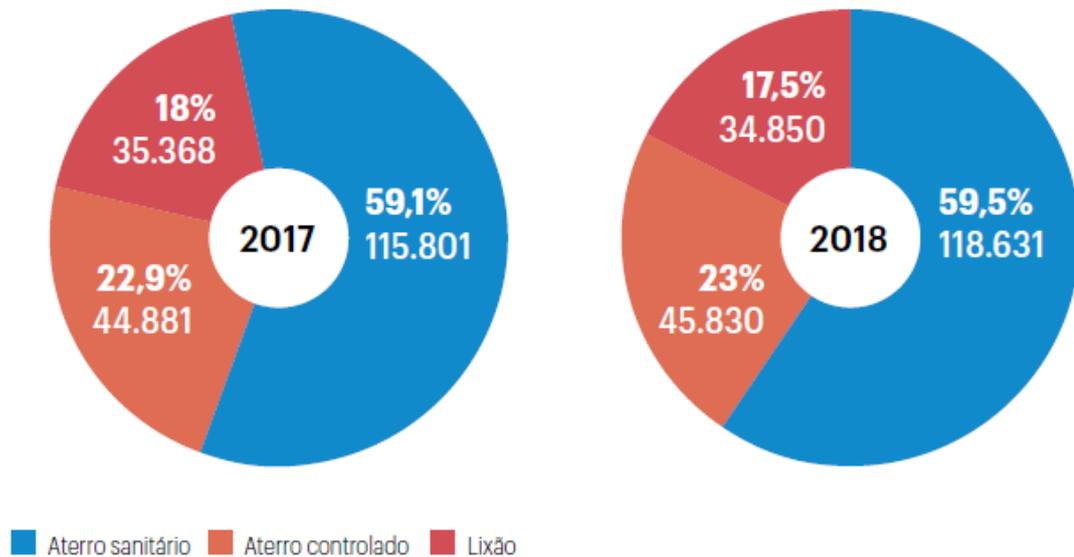
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 14 -Distribuição dos municípios com iniciativas de coleta seletiva.



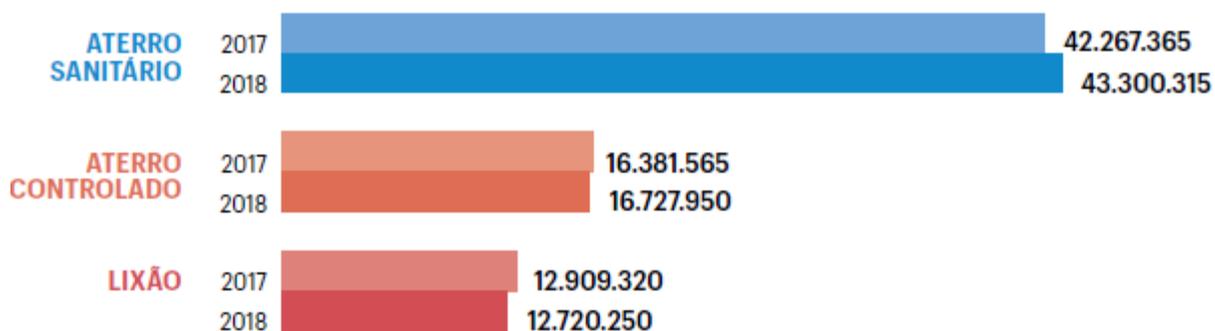
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 15 -Disposição final de RSU, por tipo de destinação (%).



Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 16 -Disposição final de RSU coletados no Brasil (toneladas/ano).



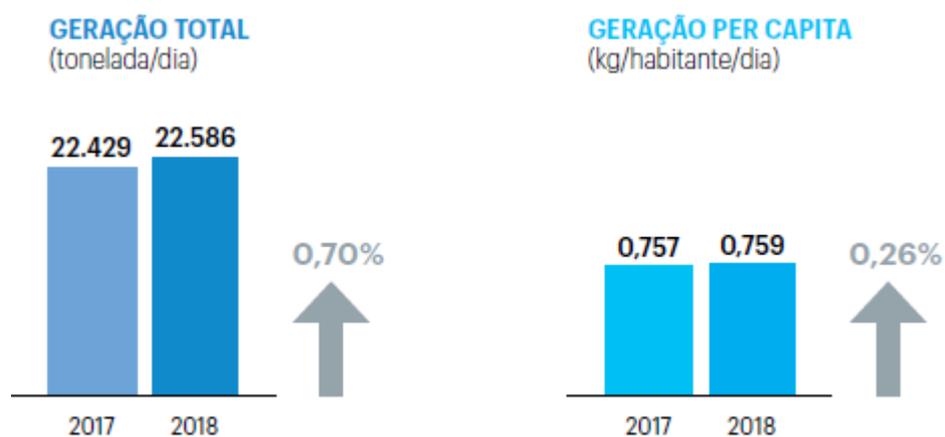
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Tabela 6 -Recursos aplicados na coleta de RSU.

Regiões	2017		2018	
	Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)	Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)
Norte	697	3,24	707	3,24
Nordeste	2.163	3,15	2.139	3,14
Centro-Oeste	597	3,13	604	3,13
Sudeste	5.343	5,12	5.263	5,00
Sul	1.345	3,78	1.318	3,69
BRASIL	10.145	4,07	10.031	4,01

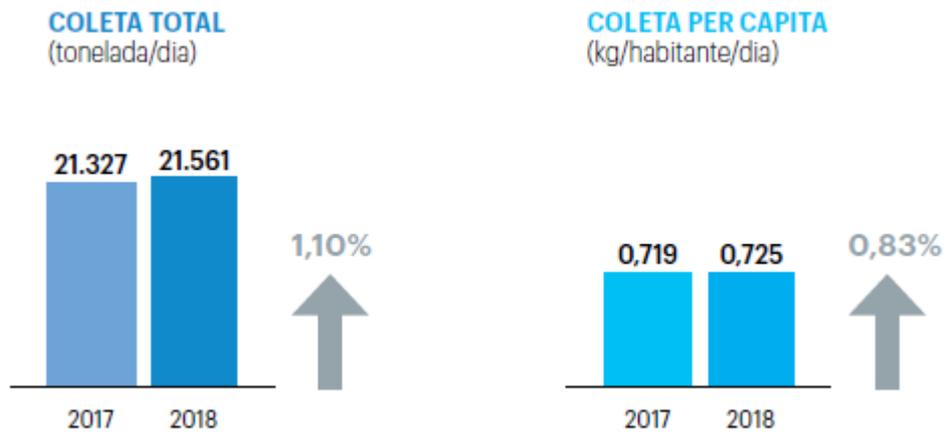
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 17 -Geração de RSU na região Sul.



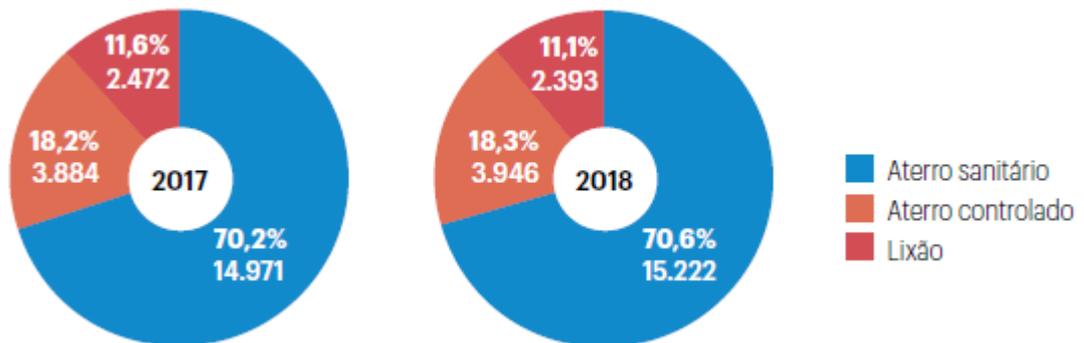
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 18 -Coleta de RSU na região Sul.



Fonte: Abrelpe/IBGE.

Figura 19 -Disposição final de RSU na Região Sul, por tipo de destinação (%).



Fonte: Abrelpe/IBGE.

Tabela 7 -Recursos aplicados na coleta de RSU e demais serviços de limpeza urbana na Região Sul.

	2017		População 2018	2018	
	Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)		Total (R\$ milhões/ano)	Por habitante (R\$/mês)
Coleta RSU	1.345	3,78	29.754.036	1.318	3,69
Demais Serviços de Limpeza Urbana*	1.571	4,42		1.546	4,33

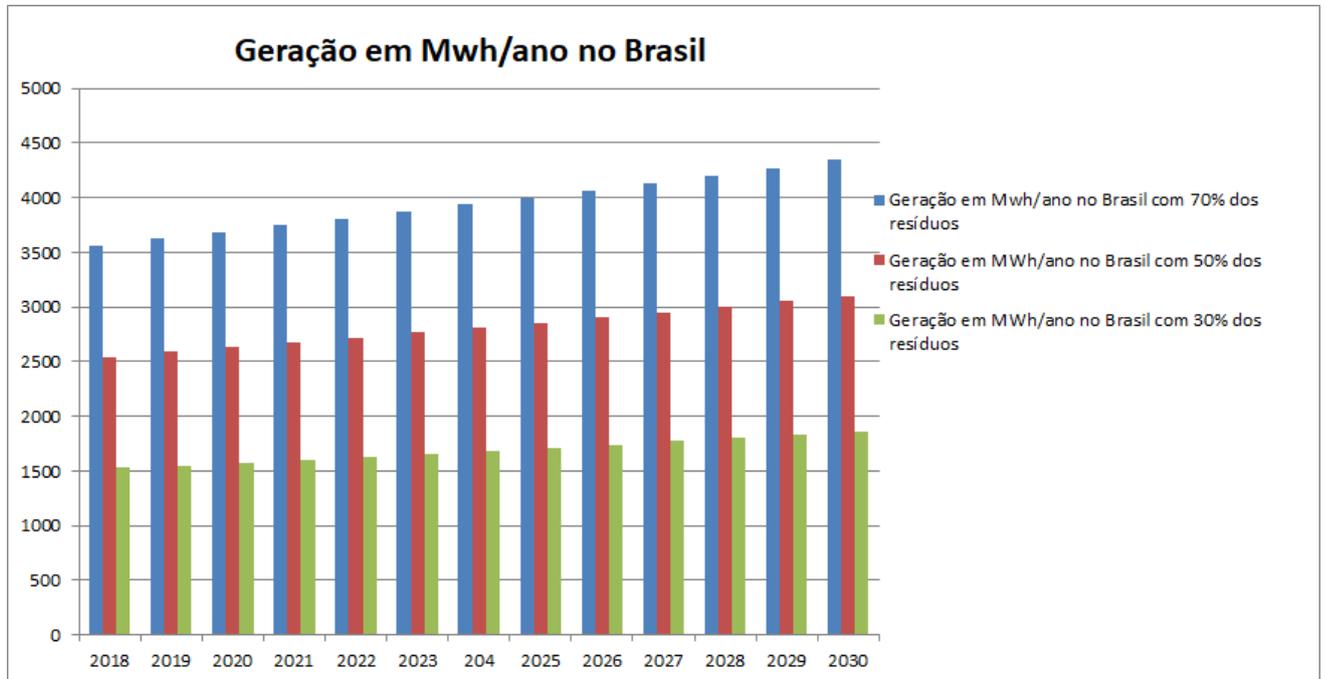
Fonte: Abrelpe/IBGE.

Fica claro, com os dados mostrados, como há a tendência de crescimento na geração de resíduos no Brasil como um todo e na região Sul do país, em particular. Também fica evidente que as regiões com maior geração de resíduos e, conseqüentemente, maior potencial para geração de energia elétrica a partir do processamento de RSU, são o Sudeste, o Nordeste, Sul, Centro-Oeste e Norte, respectivamente, em ordem decrescente. Há de se observar, também, que o Brasil possui um bom índice de cobertura de coleta, sendo que as regiões Sul e Sudeste se destacam com altos índices de cobertura, enquanto o Norte e o Nordeste possuem índices mais deficitários. E essa característica da cobertura de coleta é algo importante, pois para maximizar o processamento de resíduos de uma usina com geração de energia, é necessária uma cobertura ampla e efetiva na coleta dos resíduos nas cidades. Além disso, os dados sobre a destinação dos resíduos no Brasil e sobre os recursos aplicados na coleta de RSU são alarmantes, pois demonstram a grande quantidade de resíduos que tem um destino problemático, como é a destinação em lixões, e também mostram que a preocupação com a coleta e com os demais serviços de limpeza urbana não são prioridade para os governos, porque, enquanto há um aumento na geração de resíduos, a verba destinada à coleta e demais serviços de limpeza pública diminuem. Em contrapartida, os dados referentes à região Sul sobre a destinação de resíduos são melhores que os dados do Brasil, sendo 70,6% dos resíduos destinados a aterros sanitários, 18,3% destinados a aterros controlados e 11,1% destinados a lixões.

A partir dos dados obtidos pela Abrelpe, foi feito um estudo de caso, quantificando, de acordo com os índices de crescimento de geração e de coleta de resíduos exposto nos gráficos, um caso em que essa taxa de crescimento na geração e na coleta seja a mesma durante um período de 2018 até 2030 (0,7% de crescimento na geração da região sul, 1,1% de crescimento na coleta na região sul, 0,82% de crescimento na geração do Brasil e 1,66% de crescimento na coleta do Brasil) quando se estima que a geração de resíduos deve alcançar 100 milhões de toneladas. Com isso, foi feita a estimativa de geração de resíduos durante 12 anos no Brasil, como um todo, e na região sul do país, em particular. Após isso, foram feitos cálculos transformando a quantidade de resíduos em MWh de energia elétrica, baseados na citação da seção de incineração, a qual diz que cada 100.00 toneladas/ano se geram 7 MWh de energia elétrica, em três seguintes casos: quando utilizado 70 % do resíduo coletado para produção de energia, quando utilizado 50 % dos resíduos coletados e quando utilizado 30 % dos resíduos coletados. A Figura 19 e a Figura 20 apresentam esse estudo de caso de geração

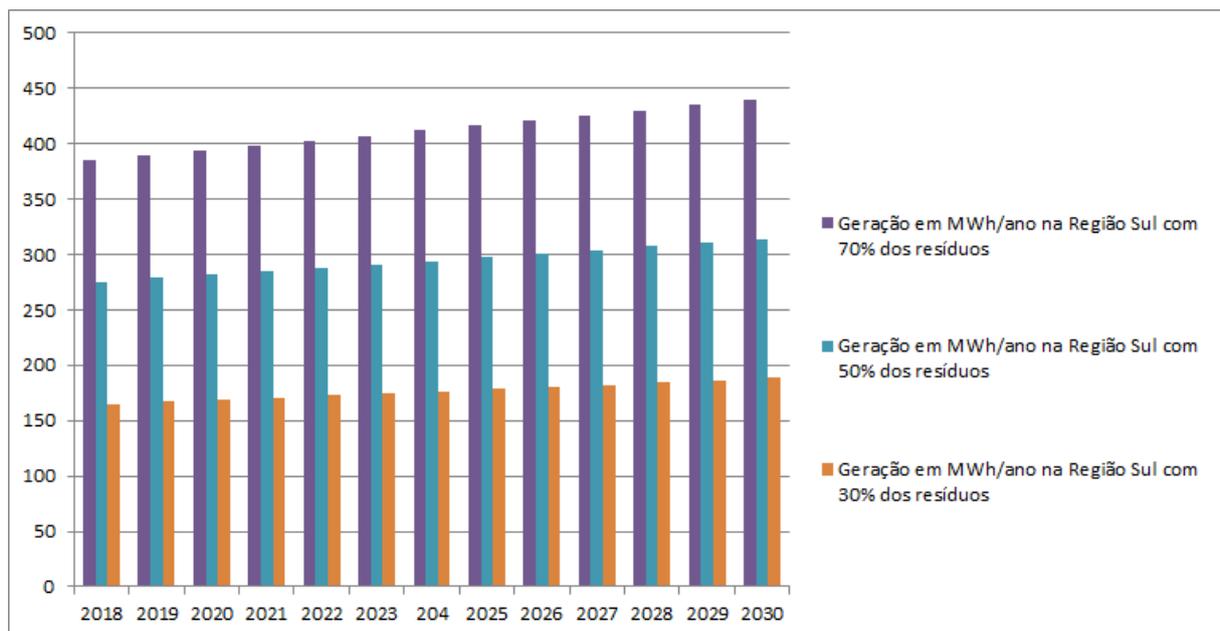
de energia com utilização parcial dos resíduos coletados de 2018 à 2030, no Brasil e na Região Sul, respectivamente.

Figura 20 - Estimativa de geração de energia elétrica MWh/ano no Brasil do ano de 2018 à 2030, em três casos, com 70 % dos resíduos, com 50 % dos resíduos, com 30 % dos resíduos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21 - Estimativa de geração de energia elétrica MWh/ano na região sul do ano de 2018 à 2030, em três casos, com 70 % dos resíduos, com 50 % dos resíduos, com 30 % dos resíduos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Vale ressaltar que é apenas uma estimativa para mensurar aproximadamente o quanto de energia elétrica poderia se produzir com uma parcela dos resíduos gerados, sendo que esses valores podem variar, pois a geração de energia elétrica depende dos tipos de resíduos que são utilizados como combustíveis e como eles são separados e/ou pré tratados, como ocorre em alguns tipos tratamento térmico já explicitados. Além disso, lembrar que parte da energia gerada é usada na própria usina e a restante é vendida à concessionária de energia. Observando os resultados obtidos no ano de 2018 ao ano de 2030 para o Brasil, no geral, e na Região Sul foi: houve um aumento na geração de energia de 21,843 % (de 72.748.515 MWh para 88.639.112,08 MWh), no caso com 70 % no Brasil, e um aumento na geração de energia de 14,028 % (de 385,618 MWh para 439,715 MWh), no caso de 70 % dos resíduos na Região Sul. Os valores mínimos de geração elétrica, no caso de 30 % dos resíduos coletados, foram, no Brasil de 1527,719 MWh no ano de 2018 e 1861,421 MWh em 2030, 165,2651 MWh no ano de 2018 na Região Sul do país e 188,449 MWh no ano de 2030. Essa geração de energia elétrica estimada é uma geração anual.

Fica claro com essa estimativa que o Brasil possui um grande potencial energético nesse sentido, além de em vários outros tipos de tecnologias de energias sustentáveis. Nota-se que, com uma estrutura adequada, a grande geração de resíduos sólidos urbanos poderia se tornar uma grande fonte de recurso energético, com capacidade para abarcar a geração de RSU. Também, devem ser consideradas algumas questões fundamentais, de maneira a viabilizar e extrair a maior eficiência dos processos, visando otimizar a geração de eletricidade e garantir um destino sustentável e ecológico dos RSU, assunto a ser explorado no próximo capítulo.

3 DISCUSSÃO

É fato que a energia elétrica é indispensável para o funcionamento da sociedade como se encontra atualmente, ainda mais durante a pandemia, na qual a crise energética encontrou certos desafios, pois, quando não havia pandemia, o pico de demanda de energia elétrica se concentrava quando as pessoas chegavam em suas casas após o trabalho, no fim de tarde, tendo que se tomar certas ações para se manter os parâmetros da rede dentro dos limites regulamentados. Com a pandemia, o consumo energético aumentou, visto que as pessoas estão trabalhando em casa ou ficando a maior parte do tempo em casa, mudando o perfil de consumo de energia elétrica. E um ponto mais agravante da situação energética atual é a crise hídrica, com uma seca rígida, fazendo com que os reservatórios trabalhem com uma baixa capacidade, cerca de 30 % a 40 % do total, o que é crítico, pois eleva consideravelmente o custo da energia elétrica devido à necessidade de suprimento de eletricidade por meio de usina termelétrica. O Brasil enfrenta a pior crise hídrica em 91 anos de monitoramento das bacias hidrográficas do país e, de acordo com Operador Nacional do Sistema Elétrico, os reservatórios do sistema Sudeste/Centro Oeste, que geram 70% da energia do país, operam com capacidade de 19,59% , nesta primeira semana de setembro (Ribeiro, Vitor, 2021). Além disso, com a consolidação da sociedade de consumo, a geração de resíduos se tornou algo inerente ao funcionamento da sociedade e, devido ao fato do Brasil não ter escassez de terras, a preocupação com o tratamento e destinação correta, assim como a possibilidade de geração de energia elétrica a partir dos resíduos, nunca foram prioridades para os governos. Outra questão intrínseca a isso é a dependência energética do Brasil de sistemas hidrelétricos, o que é problemático porque há mudanças climáticas ocorrendo no planeta e, em certos momentos, essa fonte energética não terá a capacidade de produzir energia compatível com a demanda, sendo necessário o funcionamento de usinas termelétricas, as quais são prejudiciais ao meio ambiente, pois funciona a base de combustíveis fósseis, principalmente. Ou seja, é urgente a necessidade do Brasil de diversificar sua matriz energética para diminuir sua dependência de sistemas hidrelétricos em longo prazo e a geração de energia elétrica a partir dos RSU seria uma ótima alternativa, pois sua fonte de energia é sustentável e lida com dois pontos cruciais atualmente, geração de energia elétrica e o tratamento de resíduos.

Uma característica importante para a discussão e para o aprofundamento do tema sobre tecnologias de digestão anaeróbia ou aterros sanitários com recuperação de gás é que o metano gera muito calor com sua queima e é nesse princípio físico que se encontra seu maior potencial. Quando ele é usado apenas como combustível, possui baixa eficiência e

rendimento. O rendimento pode ser melhorado se utilizado para a combustão em motores para geração elétrica e aproveitado o calor emitido de sua combustão. Dessa forma, pode ser uma boa fonte de geração de calor para aquecimento de casas, água, entre outras aplicações, o que é feito em países desenvolvidos que possuem uma estação fria rígida e severa. Porém, não é o caso do Brasil em si, que é um país tropical, embora se possam encontrar aplicações que envolvessem aproveitamento do potencial calorífico da combustão do metano nas regiões mais ao sul do país, cuja estação fria é mais acentuada.

Outra característica relevante na discussão, principalmente na parte de tratamento térmico de RSU, é que, além do fato de ser um projeto muito custoso, que necessitaria uma parceria público-privada para sua implementação, existe um agravante, já que os países desenvolvidos são os detentores dessa tecnologia, o que iria dificultar o processo de difusão e de consolidação desse tipo de tecnologia no país. Hoje em dia, existem apenas duas usinas termelétricas com esse tipo de geração no Brasil por meio de RSU, uma em São Paulo e outra em Manaus, enquanto o Japão possui 1893 usinas com esse tipo de geração em funcionamento, ficando clara essa discrepância. A respeito de questões práticas no processo de incineração, há um artigo que simula a geração de energia elétrica com RSU em diferentes casos, com variações na composição de vidro, metal, plásticos e orgânicos. A seguir são apresentados alguns resultados.

Sobre a separação de metais, a remoção desse material não afeta negativamente a produção de eletricidade. Além disso, aumenta a quantidade de materiais recuperáveis e diminui a quantidade de cinzas que seriam destinadas a aterros. A separação do vidro tem também potenciais benefícios para o processo de incineração, resultando na redução de materiais descartados em aterros. [...] A separação da matéria orgânica foi significativa, incrementando o potencial calorífico do combustível. Outra vantagem da remoção de materiais orgânicos é a possibilidade de obtenção de outros subprodutos. A produção de biogás aumenta o montante final de energia produzida, se assemelhando a valores encontrados no caso base, mostrando que, para o processo de incineração, essa separação é benéfica. Contudo, há um custo de capital de investimento significativo e custos de operação associados à produção do biogás e sua utilização. Adicionalmente, outro problema aqui observado é garantir essa separação de materiais, porque mudanças de hábito por parte da população serão necessárias, de um modo que a matéria orgânica seja separada no local de geração, com uma estrutura apropriada de coleta. Apesar da separação mecânica ser possível, é custosa e isso iria mudar a composição do combustível, pois a separação mecânica é imprecisa e poderia

também remover materiais úteis para combustão. A separação do plástico é, provavelmente, a opção mais difícil de se avaliar. A remoção de plásticos não é desejável quando o objetivo é maximizar a geração elétrica. O problema é que a combustão de RSU possui várias desvantagens devido à sua mistura complexa de frações de materiais combustíveis e não combustíveis. Algumas dessas frações possuem maior potencial de recuperação de material que energia potencial. Se o objetivo principal da usina é a geração de potência, seria melhor usar um combustível que tivesse esse propósito, ao invés de incinerar materiais que poderiam ter um processamento mais correto. No caso da separação não ser possível, economia e energia, assim como os custos de separação, devem ser levados em consideração para estimar a viabilidade econômica da operação. Além disso, o plástico apresenta cloro em sua composição e sua combustão pode causar corrosão da caldeira, que é o motivo principal para as baixas temperaturas do vapor nesse tipo de sistema (Nordi e Guilherme, 2017).

Após as elucidações e discussão feitas até aqui, fica claro que é um problema de engenharia e deve ser resolvido como tal. Ou seja, lidar com questões mais simples e, à medida que o progresso ocorre, lidar com questões mais complexas. É claro que, se houvesse a possibilidade de construir usinas termelétricas com geração de energia a partir de RSU, essa seria a melhor alternativa, visto que se trata de uma grande quantidade de resíduos por dia, ao mesmo tempo em que pode gerar bastante receita em forma de energia elétrica. Contudo, na prática, isso é complicado, visto que os custos para a construção destes tipos usinas são altos e demandaria uma parceria público-privada para a implementação desse projeto, além do fato de que as tecnologias para esse tipo de geração de energia estarem concentrados nos países mais desenvolvidos como Japão, Estados Unidos, Portugal, França entre outros, dificultando esse processo de implementação desses tipos de usinas. Dessa forma, o caminho mais viável seria incentivar e investir tanto em políticas públicas para conscientizar a população sobre a separação correta dos RSU tanto em infraestrutura de coletas seletivas e na reciclagem de materiais, com o objetivo de melhorar o tratamento e o destino dos resíduos em curto prazo, facilitando e otimizando o trabalho da coleta com a pré-separação dos resíduos em domicílio. O próximo passo seria sobre a abertura de áreas para aterros sanitários, buscando investir em aterros com recuperação de gás, pois não é tão custoso quanto construir uma usina termelétrica a base de RSU. O gás produzido poderia ser usado para geração de energia, entre outras diversas aplicações do gás, (podendo ser usado como gás de cozinha, por exemplo) gerando receita na produção de energia, movimentando a economia devido à geração de empregos, subsequentemente. E por último, buscar recursos e parcerias capazes de implementar usinas termelétricas a base de RSU em cidades com alta densidade populacional

e grande quantidade geração de resíduos por dia, com o objetivo de tratar esses resíduos e gerar energia elétrica nesse processo.

Em relação aos tipos de geração de energia a partir da recuperação de gás, aos tipos de tecnologias de usinas termelétricas a base de RSU e qual seria a opção mais viável ou a melhor alternativa, seria importante fazer uma análise de *tradeoffs*, analisando as vantagens e desvantagens de cada alternativa, assim como levando em consideração os recursos que se tem, as prioridades do projeto e a aplicabilidade e implementação de cada alternativa.

Um trecho da conclusão do documento com os dados obtidos pela Abrelpe, em 2018, que resume e sintetiza muito desta questão de resíduos sólidos no Brasil, é o seguinte:

“Os dados trazidos por esta edição do Panorama de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil mostram que foi retomada a tendência de crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos no país, que deve ser mantida nos próximos anos: conforme estimativas realizadas com base na série histórica, o Brasil alcançará uma geração anual de 100 milhões de toneladas por volta de 2030. A melhora quantitativa e qualitativa na cobertura de coleta também é uma tendência consolidada em regiões, mas há um contingente considerável de pessoas que ainda não são alcançadas por serviços regulares de coleta porta a porta. Apesar de passados nove anos de vigência da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o setor ainda apresenta alguns déficits consideráveis, principalmente no tocante a coleta seletiva, recuperação de materiais e disposição final de resíduos coletados. A coleta seletiva está distante de ser universalizada, os índices de reciclagem são bastante incipientes e pouco evoluem, e os lixões estão presentes em todas as regiões, com impactos diretos sobre o meio ambiente e as pessoas - estas, além de serem afetadas por várias doenças, com custos bilionários para tratamento de saúde, sofrem com o afastamento do mercado de trabalho. Enquanto o mundo avança em direção a um modelo mais moderno e sustentável de gestão de resíduos, o Brasil continua apresentando as deficiências verificadas há vários anos, ficando abaixo dos indicadores médios das nações da mesma faixa de renda e desenvolvimento. Ao nos aproximarmos do limiar de mais uma década, percebe-se que pouco foi feito com o objetivo de realmente reverter o quadro deficitário e que o tema não constitui uma prioridade na agenda política e social do país. No entanto, é latente a falta de recursos específicos para custear as operações do setor. Ao mesmo tempo, a tributação aplicada sobre o sistema é uma das mais elevadas e não favorece práticas sustentáveis[.]. Numa visão geral, percebe-se que o modelo atual é insustentável. A permanecer como está, tornar-se-á cada vez mais custoso e, em alguns pontos, até mesmo irreversível. Os princípios e objetivos colocados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos

em 2010 ainda não foram refletidos no mundo real, mas é urgente que sejam transformados em ações concretas. Para tanto, precisamos mudar alguns paradigmas vigentes, sobretudo em relação ao engajamento da população, à governança político-institucional e ao custeio de serviços ”(Abrelpe, 2018-2019).

4 CONCLUSÃO

Assim, conclui-se que, independente do tratamento dos resíduos, seja ele biológico ou térmico, sua implementação traz apenas benefícios ambientais e sociais para a região, além de gerar receita com a produção de energia, caso o gás seja reaproveitado energeticamente. Essa perspectiva de tratamento de RSU com geração de energia elétrica é uma perspectiva futura e visionária de uma sociedade com políticas mais sustentáveis, lidando com dois pontos críticos do contexto global atual: a energia elétrica e os resíduos sólidos urbanos.

O Brasil passa por um movimento de transição na destinação de RSU e esse é o momento oportuno para incentivar outras possibilidades de tratamento de RSU que possuam geração de energia elétrica envolvida e que, apesar de ser algo recente e não desenvolvido para o Brasil, não é novidade para outros países que possuem diversas usinas e com diferentes tecnologias relacionadas. Isso mostra que há viabilidade na implementação das usinas. Há diversos artigos que desenvolvem estudos para analisar e quantificar este problema e mostram que, apesar dos esforços, ainda há muito a ser desenvolvido nessa área de geração de energia a partir de RSU.

Outra questão a se ressaltar a partir dos dados é como se gasta cada vez mais por pessoa para se tratar dos resíduos sólidos urbanos e industriais. Com isso, imaginando que os resíduos serão um problema crescente conforme o passar do tempo, faz sentido pensar uma maneira de gerar renda, tanto no sentido de receita, na venda da energia elétrica excedente, mas também no sentido social de gerar empregos com a implementação de usinas com esses tipos de tratamento. Ao mesmo tempo, diversifica a matriz energética brasileira sustentavelmente. Além disso, tem-se o incalculável ganho para o meio ambiente.

Outro ponto pertinente é a questão da otimização dos processos e do sistema como um todo. De acordo com que os estudos têm mostrado, quanto melhor feita a separação dos resíduos sólidos antes do tratamento, seja ele qual for, melhor, pois será menos trabalho e gasto com trabalhadores ou maquinário para separação dos resíduos que, muitas vezes, é impreciso e inadequado. Logo, seria ideal que houvesse uma separação consciente dos resíduos nas residências, porém é claro que isso seria o resultado de um processo de incentivo dessa consciência por parte do poder público, viabilizando ainda mais os tratamentos de RSU com recuperação energética, principalmente aqueles tratamentos que requerem uma separação mais minuciosa para obter maior eficiência.

Além disso, focando em facilitar a viabilidade dessas tecnologias, a implementação dessas tecnologias em grandes centros urbanos ou áreas com alta densidade populacional,

como no Sudeste e no Nordeste, seria favorável tanto para a empresa, quanto para a cidade, pois seria uma grande quantidade de resíduos que a cidade não teria que se preocupar. Ao mesmo tempo, essa grande quantidade de resíduo seria absorvida pela empresa e utilizada como fonte de geração de recursos. E, a partir dessa experiência em grandes centros, disseminar essa tecnologia para o Brasil em centros menores, usando a experiência e o conhecimento adquiridos para implementar essas usinas adequadas para um contexto com uma menor taxa de processamento de resíduos. Por fim, a energia e os resíduos sólidos urbanos são questões inegavelmente essenciais à sociedade e terá que ser dada a devida atenção a esses temas em algum momento. Então, o quanto antes a sociedade se organizar, planejar e agir com soluções sustentáveis, viáveis, benéficas social, econômica e ambientalmente, melhor para ela e para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

1. A AMEAÇA DOS MICROPLÁSTICOS. SÃO PAULO: Fapesp, 2019. link disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/>
2. ABRELPE. Panorama de Resíduos Sólidos do Brasil. 2018-2019
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.419: Apresentação de projetos sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 1992
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos sólidos- Classificação. Rio de Janeiro. 1992
5. BACOCK & WILCOX COMPANY. *Steams, its generation and use*. 41st edition. 2005.
6. BARIN, Alexandre. *Seleção de Sistemas de Geração de Energia Elétrica a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: uma abordagem com lógica difusa*. 2012. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Ufsm, Santa Maria, 2012.
7. BRASIL ENFRENTA A MAIOR CRISE HÍDRICA EM 91 ANOS. Brasília, 10 set. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2021-09/brasil-enfrenta-pior-crise-hidrica-em-91-anos>. Acesso em: 13 set. 2021.
8. CETESB. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. 2014.
9. ELECTRIC PRODUCTION FROM MUNICIPAL WASTE. Santo André: Sage, 2017.
10. ENERGY GENERATION FROM MUNICIPAL SOLID WASTE AND THE CURRENT SCENARIO OF BIOGAS RECOVERY IN BRAZIL. Irati: Ciatec, 2016.
11. ENGEBIO, ENGENHARIA; FEAM, Fundação. *Estadual do Meio Ambiente. Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica econômica e ambiental da implantação de usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais. Relatório 1: Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica*. 2ª edição. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.
12. ESTUDO SOBRE A POSSIBILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS DE SANEAMENTO (LIXO, ESGOTO). Palmas: Desafios, 2018. Disponível em: <https://jornal.ufg.br/n/100573-artigo-crise-hidrica-ou-escassez-de-agua-quem-sofre-com-a-falta-d-agua>. Acesso em: 09 set. 2021.
13. HENRIQUES, RACHEL Martins. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma abordagem tecnológica. 1v. 190p. Tese de Mestrado apresentada à UFRJ, Rio de Janeiro, 2004
14. MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th Edition, 2006. 1v. 831p.

15. MOYA, Diego. Municipal solid waste as a valuable renewable energy source: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To Energy Technologies. Chania: Elsevier, 2017. 10 p.
16. MUNICIPAL SOLID WASTE TO ENERGY GENERATION IN BANGLADESH: POSSIBLE SCENARIO TO GENERATE RENEWABLE ELECTRICITY IN DHAKA AND CHITTAGONG CITY. Bangladesh, 22 ago. 2016.
17. STATUS AND OPPORTUNITIES FOR ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN EUROPE. Itália, 19 abril. 2018.
18. TECHNICAL POTENTIAL OF ELECTRICITY PRODUCTION FROM MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSED IN THE BIGGEST CITIES OF BRAZIL: LANDFILL GAS, BIOGAS AND THERMAL TREATMENT. Cascavel, 10 fev. 2014.