

FACULDADE ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

CARLOS ROBERTO MIRANDA

**INSTALAÇÃO DE USINA TERMOELÉTRICA A RSU**

CAMPINAS/SP

2021

FACULDADE ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DE ENERGIA E  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

CARLOS ROBERTO MIRANDA

## **INSTALAÇÃO DE USINA TERMELÉTRICA A RSU**

Trabalho de Graduação, apresentado por Carlos Roberto Miranda, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Gestão de Energia e Eficiência Energética da Faculdade de Tecnologia Campinas, elaborado sob a orientação do Prof. Me. Henrique Antônio Mielli Camargo.

CAMPINAS/SP

2021

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**CEETEPS - FATEC Campinas - Biblioteca**

M672i

MIRANDA, Carlos Roberto

Instalação de Usina Termoelétrica a RSU. Carlos Roberto Miranda.  
Campinas, 2021.

76 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Gestão de Energia e Eficiência  
Energética – Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof. Me. Henrique Antônio Mielli Camargo.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Energia Renovável. 3. Gerenciamento  
de Resíduos 4. Tecnologias de Transformação de Resíduos em Energia  
I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 621.31

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG GEEE 21.2

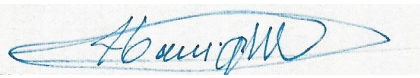
**CARLOS ROBERTO MIRANDA**

**Instalação de Usina Termoelétrica a RSU**

Trabalho de Graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Energia e Eficiência Energética pelo CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – Campinas.

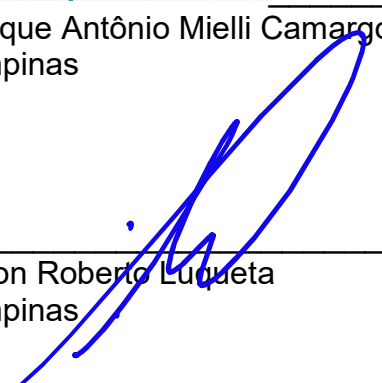
Campinas, 30 de novembro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**




---

Prof. Henrique Antônio Mielli Camargo  
Fatec Campinas



---

Prof. Gerson Roberto Luqueta  
Fatec Campinas



---

Prof<sup>a</sup> Rosani Gardin  
Fatec Campinas

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho primeiramente a Deus que me concedeu a vida e saúde, minha família por todo apoio e contribuição nesta caminhada. Em especial minha mãe que tanto insistiu para que eu fizesse um curso superior, minha esposa Vera, que sempre esteve ao meu lado, meus filhos que são minha inspiração, meus netos minha alegria.*

*Meus professores que compartilharam o conhecimento com tanta generosidade, aos meus colegas que contribuíram no processo de aprendizagem, em especial a memória do professor Milton Gonçalves.*

*À coordenação do curso que não mediu esforços para fazer com que o curso tivesse a mais alta excelência.*

*Ao professor orientador por todo o empenho em direcionar esse trabalho para seu melhor resultado.*

*E as pessoas que dedicaram seu tempo a realização de livros, artigos e outros materiais aqui supracitados.*

*" Quando você conquista algo que muito almejou, comemore sem esquecer o quanto se esforçou. Valorize teu esforço e não passe a ideia de que foi fácil a conquista."*

**(Isis Batista)**

## RESUMO

O destino que os Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) deverão receber é um trabalho que demanda um controle e estratégia, mas a maior dificuldade está em encontrar destinos que sejam uma solução viável tanto economicamente, quanto ambientalmente. Com o levantamento de dados realizados nesse trabalho foi visto que com o desenvolvimento das tecnologias, e se gerenciados corretamente, os RSUs podem ser reaproveitados como uma fonte de energia. As usinas que aderiram o processo de incineração ou digestão anaeróbica, para geração de energia elétrica a partir dos RSUs, tiveram resultados positivos, porém é um processo que demanda grandes estruturas, e grandes investimentos. O reaproveitamento dos RSUs para geração de energia traz diversos benefícios, como: diminuir o volume existente nos aterros, mitiga os gases do efeito estufa, gera emprego e ainda ajuda como uma fonte de energia renovável, ajudando assim o país no balanceamento energético. Já existem diversas usinas espalhadas pelo mundo, que abastecem grandes cidades. No Brasil possuímos algumas em desenvolvimento e implantação. O presente trabalho disserta sobre as tecnologias utilizadas na geração de energia elétrica a partir de RSUs, principalmente a gaseificação.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos. Energia Renovável. Gerenciamento de Resíduos. Tecnologias de Transformação de Resíduos em Energia

## **ABSTRACT**

The destination that Urban Solid Waste (MSW) should receive is work that requires control and strategy, but the biggest difficulty is in finding destinations that are a viable solution both economically and environmentally. With the data collection carried out in this work it was seen that with the development of technologies, and if managed correctly, MSWs can be reused as an energy source. The plants that adhered to the process of incineration or anaerobic digestion, for electricity generation from MSWs, had positive results, but it is a process that requires large structures, and large investments. The reuse of MSWs for power generation brings several benefits, such as: reducing the existing volume in landfills, mitigating greenhouse gases, generating employment and also helping as a renewable energy source, thus helping the country in energy balance. There are already several plants around the world, which supply large cities. In Brazil we have some under development and implementation. This paper discusses the technologies used in the generation of electricity from MSWs, especially gasification.

**Keywords:** Municipal Solid Waste. Renewable Energy. Waste Management. Waste-To-Energy Technologies.



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
1.1	OBJETIVO GERAL .....	12
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	12
1.3	JUSTIFICATIVA .....	13
2	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	13
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS RSUS .....	15
2.2	FORMAS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RSUS .....	16
2.2.1	Coleta Seletiva.....	17
2.2.2	Aterros Sanitários.....	18
2.2.3	Lixões.....	21
2.3	POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	22
3	CENÁRIO ATUAL DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL .....	25
3.1	MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL .....	26
3.1.1	Termelétricas .....	28
3.1.2	Biomassa .....	30
3.1.3	Hidrelétricas .....	32
3.1.4	Solar .....	33
3.1.5	Eólica .....	36
4	GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSUS.....	38
4.1	TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RSUS .....	38
4.2	PROCESSOS DE INCINERAÇÃO.....	42
4.2.1	Gaseificação .....	43
4.2.2	Pirólise.....	44
5	COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS (CDR) .....	47
5.1	BIOGÁS .....	47
5.2	Digestão Anaeróbica .....	51
5.3	Tecnologia de Plasma.....	52
6	GESTÃO DE RSUs PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL.....	54
7	PROJETO PPP RSU.....	59
8	CONCLUSÃO .....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Aterro Sanitário – esquema .....	20
<b>Figura 2</b> - Classificação das Fontes de Energias da Matriz Energética Brasileira.....	26
<b>Figura 3</b> - Diagrama dos processos de conversão energética da biomassa .....	31
<b>Figura 4</b> - Rotas de conversão da biomassa em energia .....	32
<b>Figura 5</b> - Matriz energética brasileira .....	33
<b>Figura 6</b> - Evolução da energia solar no Brasil .....	34
<b>Figura 7</b> - Rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU.....	40
<b>Figura 8</b> - Áreas gerenciais ligadas a gestão de resíduos sólidos. ....	57
<b>Figura 9</b> - Rotas tecnológicas disponíveis para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos e a reciclagem de materiais. ....	58
<b>Figura 10</b> - Relação das cidades do consórcio.....	60
<b>Figura 11</b> - Cidades que aderiram a proposta .....	60
<b>Figura 12</b> - Modelo proposto.....	61
<b>Figura 13</b> - Planta Gaseificação WEG .....	62
<b>Figura 14</b> - Geração de vapor (Caldeiras).....	63
<b>Figura 15</b> - Gaseificador.....	64
<b>Figura 16</b> - Geração de energia Elétrica (WEG / TGM) .....	65

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Usinas Termelétricas por tipo .....	28
---	----

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Tecnologias para o gerenciamento de resíduos .....	40
--	----

# 1 INTRODUÇÃO

Há tempos o meio ambiente tem sido considerado como um bem legal transcendental e comum a todos. Transcendental porque as reservas ecológicas sempre foram muito abundantes e a capacidade danosa das ações humanas, dependendo do desenvolvimento tecnológico, sempre foi desprezível. Comum, porque é de todos (Brasil, 1988).

Porém, o enorme desenvolvimento tecnológico alcançado, o aumento incessante da população do planeta e o consumo paralelo de recursos ecológicos tornaram o meio ambiente um dos mais importantes ativos legais (MOURA, 2007).

O meio ambiente é parte comum de todos, como aponta Baltazar (2019), a preocupação com o meio ambiente e com o equilíbrio das condições ecológicas foi e é um fenômeno típico da atualidade, porque o desequilíbrio ecológico é uma das piores consequências da civilização industrial.

O território nacional encontra-se intensamente urbanizado, visto que 84,4% da população reside nas zonas urbanas dos municípios e 15,4% nas zonas rurais (IBGE, 2011). Além disso, quase metade da população brasileira (44%) concentra-se em municípios que possuem mais de 200 mil habitantes (IBGE, 2010), favorecendo assim a concentração da geração e da disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), que são compostos, em média, de 52% de matéria orgânica.

O atual cenário sobre as mudanças climáticas mostra a urgente necessidade das autoridades nacionais colocarem a questão ambiental no centro dos debates de suas economias, buscando, dessa maneira, soluções ambientalmente adequadas que visem diminuir a dependência da utilização de combustíveis fósseis e não renováveis como fontes alternativas de energia (NASCIMENTO et al., 2019)

No Brasil, o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos não é feito de forma eficiente e a disposição final da maior parte do lixo coletado nem sempre é feita da forma mais adequada. Com o aumento das atividades humanas nas últimas décadas gerou-se um acelerado aumento na produção de resíduos, de modo que se tornou um grave problema para as administrações públicas. As grandes dificuldades para o manejo dos resíduos sólidos nos últimos anos foram o aumento desordenado

da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos, fazendo com que muitas vezes os resíduos sólidos sejam depositados em locais não apropriados para recebê-los, como lixões, podendo provocar graves problemas ambientais (LIMA, 2017).

Nessa direção, a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, Lei nº 12.305/10, após vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional, marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes federados – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral - na busca de soluções para os problemas na gestão resíduos sólidos que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros (LIMA, 2017)

É importante ressaltar que, conforme a recente PNRS, existe uma distinção clara entre resíduos e rejeitos (lixo), sendo o primeiro todos os materiais que sobram após ações ou processos de produção ou consumo, enquanto rejeitos (lixo) são materiais considerados inúteis, não passíveis de reaproveitamento ou reciclagem (BRASIL, 2010).

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

Mostrar como o uso dos Resíduos Sólidos Urbanos são aproveitados para geração de energia através de termelétricas.

## **1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Descrever o contexto histórico da utilização dos resíduos sólidos como fonte de energia;
- Nomear as principais tecnologias empregadas para a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos;
- Apresentar uma planta de uma Termelétrica movida a lixo;
- Mostrar o cenário das Usinas Termelétricas no mundo e no Brasil;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A sociedade precisa desenvolver formas de destinar os resíduos sólidos urbanos evitando provocar problemas ambientais, quando estes são utilizados para geração de energia, proporciona para a localidade de instalação, redução dos problemas ambientais, diminuindo a utilização das fontes geradoras de energia mais sensíveis às mudanças climáticas.

## 2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Em geral, o termo resíduo costuma ser associado a tudo o que é inútil ou simplesmente perdeu valor para a sociedade; além disso, é usado como sinônimo de coisa sem valor. Porém, tecnicamente, existe a possibilidade de reaproveitar total ou parcialmente muitos desses resíduos. Por esse motivo, denomina-se resíduo aquele remanescente que pode ser transformado em um novo produto (IBRAHIN 2014).

Toda atividade humana gera resíduos, seja de origem residencial, comercial, industrial ou qualquer outra. O conceito de geração de resíduos está intimamente ligado aos hábitos e práticas de consumo, às atividades econômicas predominantes, e ao nível socioeconômico da população, exatamente como assevera Junior, Saiani e Dourado (2014), quando se referem às características dos resíduos sólidos, que podem variar dependendo de fatores sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos.

Os resíduos sólidos são definidos segundo a norma técnica NBR 10.004 (ABNT, 2002), como resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Os resíduos sólidos são classificados quanto à sua periculosidade e quanto à sua origem, sendo os resíduos perigosos aqueles que geram risco significativo ao meio ambiente ou à saúde pública em razão de suas propriedades.

De acordo com Brasil (2010), a Lei nº 12.305/10, que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, em seu artigo 3º, Inciso XVI, assim define os resíduos sólidos:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010, p.11).

Esses materiais que constituem os resíduos sólidos são uma combinação de materiais não combustíveis e carbono. Enquanto, os rejeitos (lixo), de acordo com a Lei nº 12.305/10, que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu artigo 3º, Inciso XV, definem os rejeitos como aqueles materiais que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010, p.11).

Nessa direção, os resíduos sólidos urbanos (RSU), são considerados aqueles provenientes dos resíduos domiciliares, ou seja, provenientes das atividades domésticas em residências urbanas e, aqueles oriundos de limpeza urbana, quer dizer, provindos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (FEAM, 2012).

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil elaborado pela ABRELPE no ano de 2015 revela, “um total anual de 79,9 milhões de toneladas no país, configurando um crescimento a um índice inferior ao registrado em anos anteriores”. Observa-se que entre 2014 e 2015, a população brasileira apresentou um crescimento na geração total de RSU de 1,7%, atingindo o equivalente a 218.874 t/dia em relação ao ano anterior (ABRELPE, 2015).

Nisto reside à importância de se debater a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos, a partir de uma discussão multidisciplinar, abrangendo segmentos governamental, social e do mercado para tornar real a implementação de uma gestão sustentável de RSU (ABRELPE, 2015).

Estudos mostram que utilizar os resíduos sólidos urbanos como matriz de geração de energia é sustentável e uma opção que trará muitos benefícios tanto à



população como também ao meio ambiente. Por isso, países como Japão, China, Dinamarca e Estados Unidos têm se utilizado de tecnologias para a geração de energia elétrica, como o objetivo não só de diminuir a quantidade de descarte inadequado no meio ambiente, como também reaproveitar os resíduos sólidos urbanos (LIMA, 2017).

A utilização de resíduos sólidos como fonte de energia revela-se como uma opção considerável para reduzir os danos decorrentes do lixo urbano, além de ser também uma fonte de recursos. O aproveitamento energético dos RSU proporciona diversas vantagens socioambientais e, por isso, existe interesse em viabilizar o seu aproveitamento energético no Brasil. A produção de energia elétrica a partir desses materiais já apresenta alternativas maduras em termos tecnológicos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

Por tudo isso, ao longo do tempo os resíduos sólidos têm sido objeto de pesquisas, o que tem possibilitado tanto um melhor conhecimento sobre o potencial destes recursos, como sua utilização na geração de energia elétrica. A propósito tecnologias têm sido desenvolvidas e já adotadas em vários países, inclusive no Brasil, por meio de usinas termelétricas (LIMA, 2017).

## **2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RSUS**

Os RSUs podem ser classificados de várias formas, uma das mais fáceis de serem compreendida pela população é a divisão quanto a composição química, em duas categorias: orgânico e inorgânico. O lixo inorgânico são materiais com grandes potencias de reciclagem (papel, plástico, alumínio, vidro etc); já o orgânico são as sobras de alimentos, restos de podas, animais mortos, ou seja, que podem ser utilizados nas compostagens. Essa divisão é a menos rígida, e a de mais fácil compreensão (GOMES, 2018).

De acordo com a NBR e ABNT (2004) os lixos também podem ser classificados quanto a sua origem. Lixo doméstico é gerado basicamente em residências; Comercial: gerado pelo setor comercial e de serviços; industrial é gerado por indústrias (classe I, II e III) e os Hospitalares são gerados por hospitais, farmácias,

clínicas, etc.; tem também o especial que são podas de jardins, entulhos de construções e animais mortos.

No estudo realizado por Gomes (2018) o autor classifica ainda os lixos de acordo aos riscos de contaminação trazidos ao meio ambiente quando estes são descartados de forma errada. Deste modo podem ser:

Perigosos, que podem trazer riscos graves ao meio ambiente, por exemplo: lixos tóxicos, corrosivos, radioativos, inflamáveis, entre outros; temos os não inertes, onde eles não apresentam riscos, mas também não são inertes, por exemplo: lixos domiciliares, ou madeira, papel, etc; por último nessa classificação, temos os resíduos inertes, que são aqueles que não oferecem riscos ao meio ambiente (GOMES, 2018).

## **2.2 FORMAS DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS RSUS**

Os municípios, sejam de grande, médio ou pequeno porte, são responsáveis pela coleta e destinação final de todos esses resíduos e pela limpeza de calçadas e espaços públicos. A tarefa é complexa e deve ser permanente e regular (MARCHI, 2019).

Tradicionalmente, tanto a população quanto o governo priorizam a limpeza em relação a qualquer outro tipo de emissão de resíduos. Ou seja, os moradores depositam os seus sacos de lixo na via pública com a única expectativa de que a rede municipal de coleta se encarregue de retirar esses sacos da frente de suas casas (MARCHI, 2019).

Esse tipo de visão sobre a questão dos resíduos mostra-se limitada e ineficiente. Por um lado, porque não resolve o problema e apenas transfere a questão para o próximo elo da cadeia - dos domicílios ao sistema de coleta, do sistema de coleta ao sistema de descarte final - e, por outro, porque ele não permite aproveitar as potencialidades de valorização e reciclagem (PEREIRA, 2019).

Geração de resíduos, a implementação de sistemas de recolha e transporte eficientes, a maximização da recuperação de materiais para reutilização e reciclagem na indústria e a aplicação de sistemas de eliminação final adequados, de forma a promover que apenas seja necessário eliminar os resíduos que não possam ser valorizados (MARCHI, 2019).

De acordo com Gomes (2018), é de fundamental importância obter o

conhecimento e o planejamento dos processos e das tecnologias para a adequada implantação ou melhoria do gerenciamento de RSU. A coleta, o transporte e o destino são ações sanitárias inclusas nesse gerenciamento.

### 2.2.1 Coleta Seletiva

Para Sosma (2015), a coleta seletiva é a mais usada para ajudar no processo de reciclagem. Ela se divide em seis categorias: papel, plástico, vidro, metal, orgânico e outros materiais. Cada categoria é definida por uma cor:

Lixeira da cor azul receberá lixos de papeis e ou papelão, como revistas, livros, caixas e embalagens; lixeira da cor vermelha receberá lixos plásticos como garrafas pets, frascos, embalagens e garrafões; lixeira da cor verde receberá lixos onde seu material seja de vidro; lixeira da cor amarela receberá lixos de metais como as latinhas de refrigerante; lixeira marrom receberá lixos orgânicos, ou seja, restos de alimentos, restos de plantas, restos de animais e entre outros que se encaixe nesse perfil; e por fim temos a lixeira cinza, que deve-se jogar todo material que não pode ser reaproveitado (SOSMA, 2015).

Esse processo de seletividade é o primeiro passo para realizar a reciclagem, ou seja, a separação do lixo por material, com o seu posterior destino para o reaproveitamento. A reciclagem é um processo de transformação de materiais usados em novos produtos, sendo empregada na recuperação de uma parte do lixo sólido produzido. Com o objetivo de diminuir a produção de rejeitos e o seu acúmulo na natureza, reduzindo assim o impacto ambiental (GOMES, 2018).

Atualmente, o Brasil produz 214.405 toneladas de RSU por dia. Desse total, 58,4 % são destinados a aterros sanitários, 24 % aterros controlados e 17,4 % a lixão a céu aberto. O Brasil é um país que produz uma quantidade de lixo alta, que se compara com países de 1º mundo, mas realiza um tratamento e aproveitamento de lixo como um país de classe baixa. (ABRELPE, 2016).

Os sistemas de coleta seletiva do país têm sido utilizados com maior ênfase em três modalidades, conforme descrito por Bringhenti (2004):

- Coleta Seletiva em Postos de Entrega Voluntária: o próprio gerador desloca-se até um posto de entrega e deposita o material reciclável,

previamente triado, em recipientes diferenciados por tipo de materiais.

- Coleta Seletiva Porta a Porta: o material reciclável, previamente segregado por tipo ou não, acondicionado e apresentado à coleta pelo gerador é coletado por veículos dimensionados para realizar tal tarefa, ainda, na porta da residência do contribuinte
- Coleta Seletiva por Trabalhadores Autônomos da Reciclagem: um grupo de trabalhadores autônomos, em geral apoiado e/ou gerenciado por uma organização de caráter social, com ou sem apoio logístico do poder público, recolhe o material reciclável disposto em via pública, oriundo de domicílios, ou gerados em estabelecimentos comerciais, de serviços ou em indústrias, utilizando-se, normalmente, carrinhos de tração manual (BRINGHENTI, 2004)

Apesar de toda tecnologia existente, alguns materiais não podem ser reciclados, por exemplos: etiqueta adesiva, papel de fax, papéis plastificados, papel-carbono, fita adesiva, isolante, cliques, tachinhas (ROCHA, 2017).

Outros dejetos também ficam de fora da reciclagem: guardanapos, filtro de cigarros, rolhas, acrílico, papéis sujos, papéis sanitários, copos de papel, esponjas de aço, tomadas, espelhos, cerâmica, porcelana e espuma. Esses materiais devem ser designados a locais específicos, os aterros sanitários (ROCHA, 2017).

De fato, Ferreira et al (2012) ressalta a importância da coleta seletiva não somente pelas questões ambientais, pois visa melhorias econômicas e sociais daqueles envolvidos no processo, visto que a coleta de materiais recicláveis surgiu da necessidade de gerar recursos para famílias de baixa renda

### **2.2.2 Aterros Sanitários**

Segundo IBAM (2001), o aterro sanitário é um método para disposição final dos resíduos sólidos urbanos sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ao meio ambiente, em particular à saúde e à segurança pública.

Para o aterro controlado, precauções tecnológicas executivas são adotadas durante o desenvolvimento do aterro, como o recobrimento dos resíduos, aumentando

a segurança do local, minimizando os riscos de impactos ao meio ambiente e à saúde pública (JESUS, 2013).

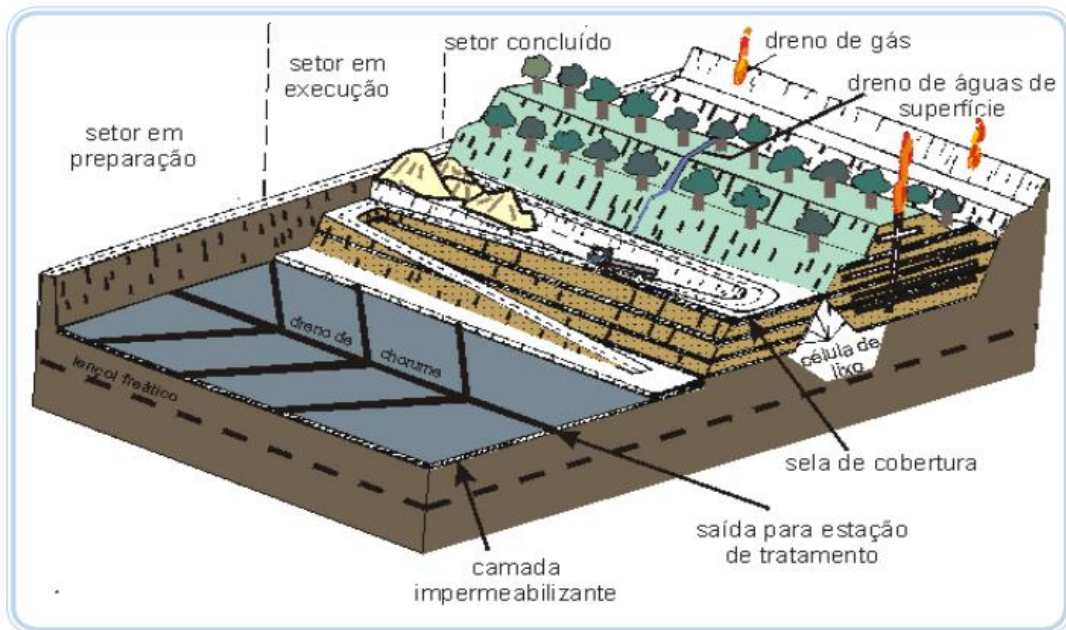
Um aterro sanitário funciona como um biorreator em que fenômenos biológicos de degradação dos resíduos podem processar-se em ambiente anaeróbio ou parcialmente aeróbio. Após a disposição de resíduos num aterro verificam-se, sucessivamente, metabolismos aeróbios e, sobretudo, anaeróbios. Com efeito, o oxigênio contido inicialmente na massa de resíduos difunde-se pelas camadas superiores permitindo a atividade aeróbia dos microrganismos. Esgotando-se o oxigênio, inicia-se a fase anaeróbica, que será predominante (MOTA, 2000; RUSSO, 2005).

Um aterro sanitário é um método de disposição que não provoca prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utiliza princípios de engenharia de modo a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de solo ao fim de cada dia de trabalho, ou mais vezes se necessário (JESUS, 2013).

Aterros sanitários são implantados conforme técnica de área, pelo qual formam-se camadas de resíduos (células) sobre uma base impermeabilizada. Estes aterros contam com um conjunto de elementos de proteção ambiental que inclui impermeabilização de base, através de barreiras naturais e sintéticas, sistema para a drenagem de águas pluviais, gases e percolados. Os líquidos contaminados são encaminhados para tratamento (JESUS, 2013).

Os resíduos são recepcionados e pesados na entrada do aterro, e espalhados para serem compactados ao solo com o objetivo de reduzir a área que seria ocupada pelos resíduos a fim de prolongar a vida útil do mesmo. Em seguida, é realizada uma cobertura com solo a fim de evitar que os resíduos fiquem expostos a céu aberto e os animais, como urubus e roedores, entrem em contato com os mesmos, formando uma célula (Fig. 1). O biogás formado deve ser recolhido para ser queimado ou utilizado como fonte de energia (SILVA, 2013).

**Figura 1** - Aterro Sanitário – esquema



Fonte: Adaptado de Silva 2013

Os aterros sanitários se aplicam a todas as localidades com resíduos suficientes para justificar economicamente o uso de máquinas para as operações de escavação, preparo do terreno, corte de material de cobertura, movimentação, espalhamento, compactação e recobrimento da massa de resíduos sólidos (JESUS, 2013).

Durante o processo de biodegradação dos resíduos, ocorre a geração de lixiviados, que são a soma do chorume, precipitação atmosférica e umidade natural dos resíduos. Seu tratamento, que deve ser realizado em estações específicas, é responsável pelos custos elevados de manutenção dos aterros sanitários. Os impactos ambientais estão entre as desvantagens deste tipo de alternativa para destinação final, sejam relativos ao solo, à água ou atmosfera.

Os aterros sanitários contribuem para a emissão global antropogênica de metano para a atmosfera, um dos gases do efeito estufa. Além disso, o mau cheiro causa depreciação imobiliária nas regiões adjacentes e, dependendo da composição dos gases do biogás, como por exemplo, o gás sulfídrico, podem provocar danos nas vegetações próximas e ser tóxico aos operários do aterro (RUSSO, 2005).

A operação inadequada de aterros sanitários pode atrair insetos, roedores e aves carniceiras, o que pode constituir um potencial risco à saúde pública por atuarem como vetores de disseminação de doenças (SILVA, 2010; SILVA et al., 2011).

Contaminações do lençol freático e de águas superficiais também são comuns em aterros sanitários mal projetados, levando a sérios problemas ecológicos (IBAM, 2001; RUSSO, 2005).

O aterro sanitário, até o momento, ainda é a opção mais utilizada no Brasil, por ser atualmente a forma mais segura e econômica para a disposição de RSU. A pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2013) revelou que 58,3% dos resíduos urbanos coletados foram para aterro sanitário, os demais para aterros controlados (24,3%) e lixões (17,4%), ou seja, uma parte dos RSU ainda possui destino impróprio.

O aterro sanitário é uma solução para qualquer volume, apresenta simplicidade executiva, não exige equipamentos especiais, permite o controle de vetores e a transformação do material degradável em estabilizado ocorre natural e biologicamente. Aspectos positivo é a recuperação de energia na forma de gás metano (JESUS, 2013).

Deste modo, na busca por mudanças sustentáveis e soluções não tradicionais para o problema dos resíduos sólidos nas cidades, a recuperação energética a partir dos RSU surge como uma alternativa importante para auxiliar na solução do problema do lixo municipal, além de contribuir como fonte alternativa de energia (ZHENG; PAN, 2014).

Até mesmo porque diante de um cenário de escassez de recursos ambientais, a utilização de energias renováveis e limpas poderá contribuir para amenizar a crise energética e reduzir os impactos ao meio ambiente, além de promover o desenvolvimento sustentável (ZHENG; PAN, 2014).

### **2.2.3 Lixões**

O lixo se tornou um problema público por dois fatores fundamentais. O primeiro fator é atribuído à visão higienista surgida no século XIX, na qual os resíduos deixaram de ser incômodos e se transformaram em elementos perigosos no ambiente urbano. O segundo fator está associado à premissa de consolidação de um Estado Moderno por meio de mecanismos institucionais, regulação social e política que sustentaram a criação de um espaço físico limpo, ordenado e estético (MARCHI, 2019).

Entender o lixo como elemento perigoso permitiu que o assunto fosse tratado como uma questão técnica altamente especializada, com o objetivo último de criar um espaço que atendesse aos padrões da modernidade - limpeza, ordem e beleza - situação que perdurou até depois do Século XX. (MARCHI, 2019).

No entanto, como menciona Gomes (2020), essa concepção é problemática por deixar de lado as questões culturais, econômicas e geográficas. Ou seja, o problema do lixo foi definido como um problema altamente especializado, principalmente nas áreas urbanas, que precisa ser resolvido tecnicamente, apesar de depender de outros fatores como os costumes e o tipo de práticas de produção.

### **2.3 POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

A existência de vulnerabilidade ambiental se agrava a cada dia mais em decorrência das ações da sociedade sobre a natureza, que afetam os recursos naturais e, portanto, o patrimônio de todos, pondo em risco a qualidade e as condições do meio ambiente e da saúde, através da contaminação dos solos, das águas e da atmosfera em suas diferentes formas como ruídos, odores, descargas, lixo e resíduos nocivos, derrubada, queimadas e destruição de florestas indiscriminadamente, entre outras atividades danosas (BRANCO, 2014).

É promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), caracterizada pelo fato de incluir vários princípios teóricos, organizacionais e orientadores sobre a questão dos resíduos considerados inovadores, uma vez que os compreende como um todo com os empresários produtores de bens e serviços, com o Poder Público, responsável pela gestão do setor e junto à sociedade de consumo e geradora dos objetos e serviços consumidos (ZAGO; BARROS, 2019).

A aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/2010) veio suprir a lacuna de políticas no setor de saneamento, especialmente no setor de resíduos, e promover a gestão adequada dos RSU, garantindo responsabilidade entre todos os envolvidos na cadeia produtiva (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

Tal legislação é clara, só poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos RSU quando comprovada sua viabilidade técnica e ambiental. Considerando-se o disposto na lei mencionada e no que tange às



tecnologias de recuperação energética dos resíduos, é possível apontar possibilidades técnicas para tal atividade, o que poderia comprovar a hipótese de viabilidade (técnica e ambiental) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

Desse modo, em 2 de agosto de 2010, a Lei nº 12.305 foi finalmente sancionada pelo Presidente da República, Luiz Inácio Lula da Silva, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, sancionada após um processo excessivamente longo de quase 21 anos de tramitação no Congresso Nacional. A demora reflete a enorme complexidade do assunto tratado, em um estado federal com características distintivas díspares, típico do Brasil, além de cumprir rituais burocráticos excessivamente pesados (GODOY, 2013).

A PNRS surge para tentar minimizar o problema dos resíduos, uma vez que agora não apenas o governo, mas os produtores e até os consumidores são responsáveis pela destinação e tratamento correto do seu material obsoleto, através do processo de logística reversa. Estabelece também uma responsabilidade compartilhada entre governo, indústria, comércio e consumidor final no gerenciamento e na gestão dos resíduos sólidos (SILVA et al., 2010).

No Brasil, a Lei 12.305/2010 da Política Nacional dos Resíduos Sólidos institui um novo marco regulatório para a gestão dos resíduos no país, o qual reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambiental adequado. Sendo necessária uma nova interpretação para a lei diferenciar o que é material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade (MAIELLO; BRITTO; VALLE, 2018).

Não é uma lei comum que legisla sobre uma questão específica. É uma lei muito mais inclusiva, considerada por Barbosa (2019) como um verdadeiro código ou lei de diretrizes básicas sobre resíduos. É classificada como inclusiva, pois incorpora aspectos correlatos ou adjacentes à área específica de resíduos sólidos, aspectos que contribuem para a correta gestão dos resíduos sólidos que poderia ser considerada inédita na maioria das legislações mundiais por incluírem os resíduos como objetos isolados (BARBOSA, 2019).

Ao contrário, a nova lei correlaciona os resíduos sólidos com o ambiente de onde são obtidos os materiais e as energias que as empresas produtoras transformam

em bens e serviços e com a comunidade que os consome, que atua como agente e paciente diante do desperdício, como já era o caso (ZAGO; BARROS, 2019).

Vários princípios que não estavam contemplados na legislação dispersam já existente no Brasil, são inovadores. Os princípios orientadores, como prevenção e precaução, eram desconhecidos na prática; a do poluidor-pagador e a do protetor-receptor; ciclo de vida dos objetos; interação poder público, setor empresarial e sociedade; reconhecimento dos materiais recicláveis como bens econômicos, de valor social, geradores de renda, entre outros novos princípios (BARBOSA, 2019).

Para a concretização das suas disposições, foram dados prazos mais alargados - quatro anos, na maior parte das suas disposições e dois anos, para a implementação dos planos estaduais e municipais, tempo, estimado por muitos, insuficiente para ser implementado a nível nacional, conhecidas as características físicas social e institucional do Brasil (BARBOSA, 2019).

Dentre os princípios que norteiam a PNRS estão os seguintes:

- a) prevenção e precaução, ou seja, ter os cuidados necessários com antecedência quanto aos riscos apresentados pelos resíduos, caso seu manuseio seja incorreto;
- b) poluidor-pagador e protetor-receptor, penalizando aqueles que impactam o meio ambiente, recompensando aqueles que o protegem;
- c) visão sistêmica, reunindo as variáveis meio ambiente, sociedade, cultura, economia, tecnologia e saúde pública;
- d) desenvolvimento sustentado, considerando o crescimento futuro de bens e serviços para as comunidades;
- e) ecoeficiência, pela qual uma sociedade desenvolveria sua qualidade de vida sem impactar o meio ambiente;
- f) cooperação entre poder público, setor empresarial e sociedade;
- g) responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos objetos;
- h) reconhecer que os resíduos possuem um valor econômico de interesse social;
- i) respeito pela diversidade local e regional;
- j) direito da sociedade à informação e mecanismos de controle; e
- k) razoabilidade e proporcionalidade na cobrança de taxas e impostos relativos aos resíduos (BRASIL, 2010).

Entretanto, reconhece-se que muito ainda precisa ser feito para um adequado gerenciamento integrado de resíduos, o qual depende, dentre outros fatores, da

vontade política dos municípios, do aporte de recursos humanos e financeiros, da construção de instalações e aplicação de técnicas inovadoras e, sobretudo, da participação cidadã e solidária e do controle social (SILVA et al., 2010).

### **3 CENÁRIO ATUAL DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

As fontes de geração de energia elétrica no Brasil durante os anos de 2013 e 2014 sofreram consideráveis alterações, ocasionadas principalmente pelas condições climáticas desfavoráveis, que reduziram a oferta hídrica no País, e pelo aumento de 2,9% no consumo de eletricidade em 2014 (EPE, 2015).

Mesmo com o incremento de 3.177 MW na produção de energia no parque hidrelétrico nacional, que foi instalado durante esses anos, a participação de fontes renováveis (hidráulica, eólica, biomassa e nuclear) sofreu recuo de 4,6% na matriz nacional se comparada ao ano de 2013, mesmo com o aumento de 85,6% da participação da energia eólica (EPE, 2015).

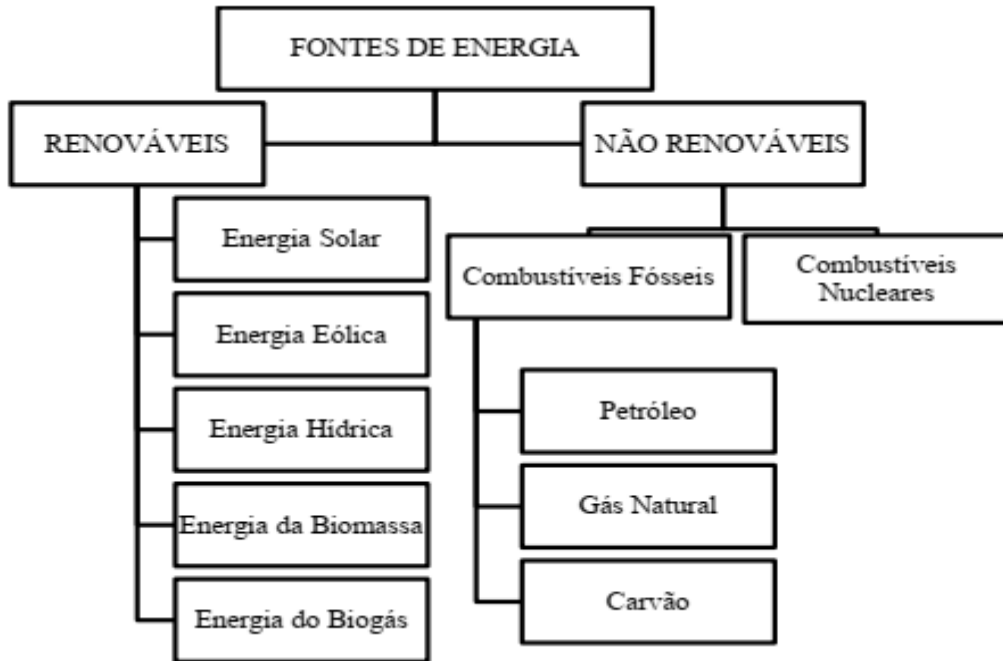
Por outro lado, as fontes de energia não renováveis que queimam combustíveis fósseis (térmicas a óleo diesel, gás natural e carvão), consideradas importantes fontes causadoras do aquecimento global, aumentaram em média 19,8%. A produção das usinas térmicas movidas a óleo diesel e carvão mineral aumentaram em 43,2 e 24,2%, respectivamente (EPE, 2015).

As fontes de energia alternativas são as fontes que se apresentam como forma de auxílio em relação as fontes tradicionais (petróleo, carvão mineral, hídrica e gás natural). A vantagem é que são poucas ou não poluentes. A Figura 2 mostra um fluxograma com alguns exemplos de fontes de energia renováveis, são elas: eólica, solar, geotérmica, mare motriz, biomassa e o biogás (VENTURA, 2009).

Essas fontes se apresentam como uma forma de aumentar e complementar a oferta de energia, sem causar danos ao meio ambiente. Elas são fontes que utilizam as forças das águas, dos ventos ou a energia do sol, como combustíveis usados para a geração da energia elétrica. Por meio de turbinas e geradores podemos transformar

outras formas de energia, como a mecânica e a química, em eletricidade (ANEEL, 2014).

**Figura 2** - Classificação das Fontes de Energias da Matriz Energética Brasileira



Fonte: Gomes 2018

### 3.1 MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL

Estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), anunciam que a maior fonte geradora de energia no Brasil é a hídrica. Ela está no topo da Matriz Elétrica Brasileira, mas isso ocorre porque o Brasil é um país que contém grandes cursos d'água espalhados por quase todo o seu território. Porém quando analisado a matriz energética mundial, a realidade é diferente, a principal fonte de energia do mundo são as usinas termelétricas alimentadas por combustíveis fósseis (EPE, 2016).

Ainda, segundo a EPE (2016), a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 150.338 MW, tendo um acréscimo de 9.479 MW quando comparados a 2015.

A geração através de energia hidráulica atinge 68,1 % de toda a oferta de

potência, e a energia da biomassa já alcança 8,2 %, atingindo a terceira posição de maior potencial em geração de energia. O Brasil atualmente possui 80,4 % da geração da sua energia de fontes renováveis, com um indicador muito superior ao indicador mundial que chega a 20 %. A AIE (Agencia Internacional de Energia) simula que em cerca de 20 anos, 30 % de energia consumida mundial será de fontes renováveis (MME, 2016).

A termelétrica vem em como segunda fonte de energia principal no Brasil. Hoje, são o tipo mais comum do mundo, de uma forma geral a geração se dá através a queima de combustíveis (carvão mineral e/ou gás natural são os mais usados) para aquecer a água. O vapor produzido é usado para acionar uma turbina movida a vapor, e a mesma está acoplado a um gerador elétrico, esse processo ocorre a conversão de energia mecânica em energia elétrica. Mas juntamente com esse procedimento, ocorre os piores impactos ambientais em relação a geração de energia, que são a emissão de gases de efeito estufa e a poluição do ar (EPE, 2015).

Conforme Goldemberg (2007), a produção de energia a partir de matéria orgânica (biomassa) é uma das soluções com maior capacidade de avanço, tanto no brasil como no mundo. Sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da Matriz Energética e conseqüentemente a redução de combustíveis fósseis. Dessa fonte, podemos extrair energia elétrica de biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol.

Para Babcock e Wilcox (2005), se analisado o assunto de um modo geral, essa alternativa de geração de energia não é realizado necessariamente só a materiais orgânicos. A maior parte de restos produzidos pelo homem podem ser utilizados como combustível para ser convertido em energia.

De acordo com Maffioletti e Mota (2013), um exemplo desse tipo de processo são os aplicados hoje nas indústrias de arroz, onde as cascas são utilizadas para alimentar as caldeiras. A partir da queima desse resíduo, irá produzir calor. Essa casca que não seria utilizada no processo de industrialização do arroz, agora é aproveitada, e assim evita que aumente a produção de lixo da indústria, dando uma alternativa para seu destino final.

Esse processo ajuda na imagem da empresa, tanto em relação ao meio

ambiente (pois com isso ela está realizando as medidas mitigadoras como PNRS pede) e também financeiramente, pois parte da energia que ela deveria consumir, está sendo gerado por essa fonte alternativa (MAFFIOLETTI; MOTA, 2013).

### 3.1.1 Termelétricas

As usinas termelétricas são as únicas que podem usar combustíveis diversos (fósseis ou renováveis) para conversão de energia. Os processos e tecnologias utilizados são diferentes para cada tipo de combustível, porém, independentemente do combustível utilizado, a geração de energia elétrica numa termelétrica é sempre baseada na conversão da energia térmica para energia mecânica, e esta por sua vez, transformada em energia elétrica (SONNTAG et al., 2003).

As informações gerenciais da Agência Nacional de Energia Elétrica (2015) apresentam em detalhe as usinas termelétricas que utilizam a biomassa para a produção de energia, conforme demonstrado na Tabela 1. Nota-se que a biomassa a partir de resíduos divide-se em Resíduos Animais e Resíduos Sólidos Urbanos e, ambas, somam um total de 22 usinas no Brasil com capacidade para produzir 62.317 kW.

**Tabela 1** - Usinas Termelétricas por tipo

Tipo			Usinas Termelétricas <sup>4</sup>		
			Quantidade	Potência Instalada (KW) <sup>5</sup>	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	387	9.933.550	25,9%
		Biogás - AGR	2	1.500	0,0%
		Capim Elefante	3	65.700	0,2%
		Casca de Arroz	11	39.533	0,1%
	Biocombustíveis Líquidos	Óleos vegetais	2	4.350	0,0%
	Florestas	Carvão Vegetal	7	51.397	0,1%
		Gás de Alto Forno - Biomassa	8	109.865	0,3%
		Licor Negro	17	1.785.102	4,7%
		Resíduos de Madeira	47	358.925	0,9%
	Resíduos Animais	Biogás - RA	12	2.081	0,0%
	Resíduos Sólidos Urbanos	Biogás - RU	10	62.317	0,2%

Tipo			Usinas Termelétricas <sup>4</sup>		
			Quantidade	Potência Instalada (KW) <sup>5</sup>	%
Fóssil	Carvão Mineral	Calor de Processo - CM	1	24.400	0,1%
		Carvão Mineral	13	3.389.465	8,8%
		Gás de Alto Forno - CM	9	200.290	0,5%
	Gás Natural	Calor de Processo - GN	1	40.000	0,1%
		Gás Natural	135	12.852.650	33,5%
	Outros Fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,4%
	Petróleo	Gás de Refinaria	7	339.960	0,9%
		Óleo Combustível	39	3.935.151	10,3%
		Óleo Díesel	1.563	937.928	2,4%
		Outros Energéticos do Petróleo	16	4.090.553	10,7%
<b>Total</b>			<b>2291</b>	<b>38.372.017</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: Adaptado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

A conversão da energia térmica em mecânica se dá através do uso de um fluido que produzirá, em seu processo de expansão e variação de temperatura, trabalho nas máquinas térmicas (turbinas ou motores). O acionamento mecânico do gerador elétrico, acoplado ao 51 eixo destas máquinas, permite a conversão de energia mecânica em elétrica (SONNTAG et al., 2003).

Depois da energia hídrica, o parque termelétrico ocupa o segundo lugar na matriz elétrica brasileira, em terceiro lugar se tem a energia solar, seguindo da energia eólica e nuclear (SILVA et al. 2018). O parque termelétrico utiliza a biomassa como insumo para produção de energia, o que pode vir a ser uma alternativa plausível para utilização de resíduos sólidos urbanos na produção de energia renovável (EPE, 2007).

As termelétricas funcionam a partir de processos denominados de ciclo a vapor (ou ciclo Rankine), ciclo simples (ou motor de combustão alternativo), ciclo com turbina a gás (ou motor de combustão rotativo) e ciclo combinado (ciclos a gás e a vapor) (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

Além disso, as centrais termelétricas podem operar com o processo denominado de cogeração (o calor gerado no processo é reaproveitado em processos térmicos dentro ou fora da termelétrica) (SONNTAG et al., 2003). Neste trabalho será discorrido a respeito das termelétricas que operam com o ciclo a vapor, uma vez que essas podem operar a partir de combustíveis diversos, foco desta pesquisa.

Segundo EPE (2007), este processo ocorre de tal forma onde:

a) Biomassa energética florestal: derivada dos recursos florestais, sua utilização no uso final energético acontece, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica, como combustão direta e carbonização; b) Biomassa energética agrícola: são os combustíveis produzidos das plantações não florestais, originados de colheitas anuais; c) Rejeitos urbanos: a biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos tendo como rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético a: combustão direta, a gaseificação, pela via termoquímica, após a separação dos materiais recicláveis, e a digestão anaeróbica, na produção de biogás, pela via biológica.

### 3.1.2 Biomassa

A biomassa possui diversas origens, como por exemplo: industriais, animais, vegetais e ou florestais. A partir da biomassa, podemos gerar energia em diversos processos, ou seja, a biomassa é a forma de geração de energia que é derivada de toda matéria orgânica, de origem vegetal. Sendo essa considerada um recurso natural renovável, contrariamente aos combustíveis fósseis (GOMES, 2018).

Biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos (ANEEL, 2010).

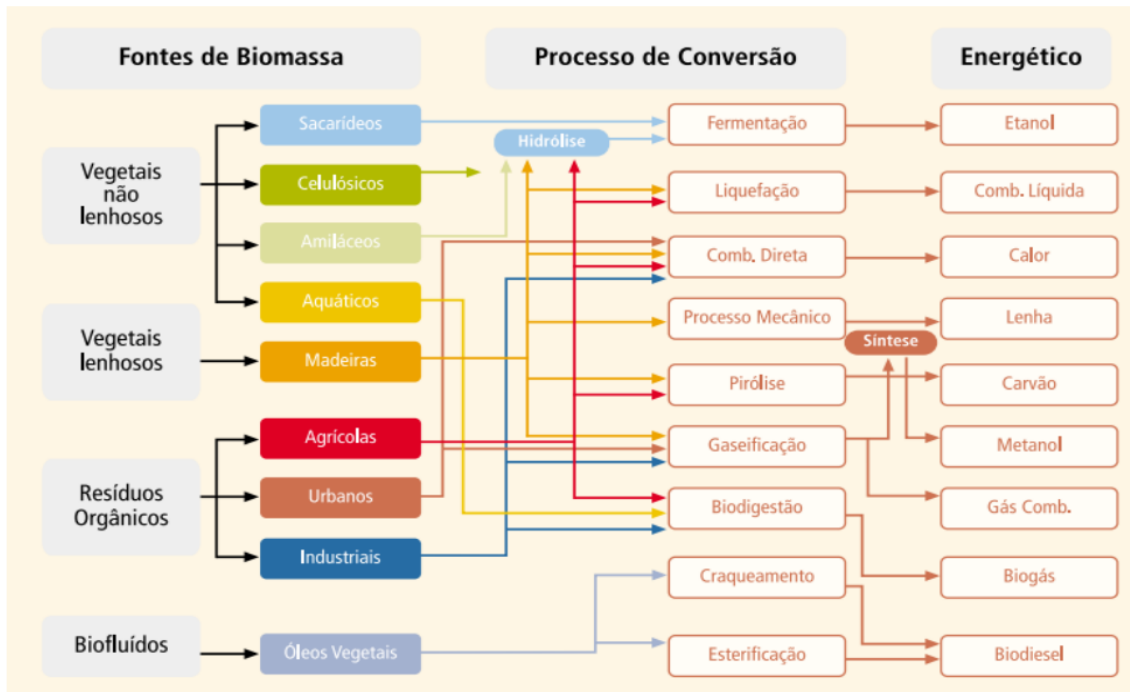
Para ser possível aproveitar a biomassa, deve ser realizado alguns processos. A Figura 3 apresenta os principais processos de conversão da biomassa em energéticos. As principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são descritas a seguir.

A biomassa possui uma enorme flexibilidade, tanto para produzir energia elétrica quanto para influenciar no setor de transportes com a produção de biocombustíveis. Existem diversos benefícios em utilizar a biomassa como fonte de energia, pois tem baixo custo de aquisição, as 33 emissões produzidas nos processos



de conversão não contribuem para o efeito estufa, sendo assim bem menos agressivo ao meio ambiente do que as provenientes de combustíveis fósseis (GOMES, 2018).

**Figura 3** - Diagrama dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: ANEEL, 2010

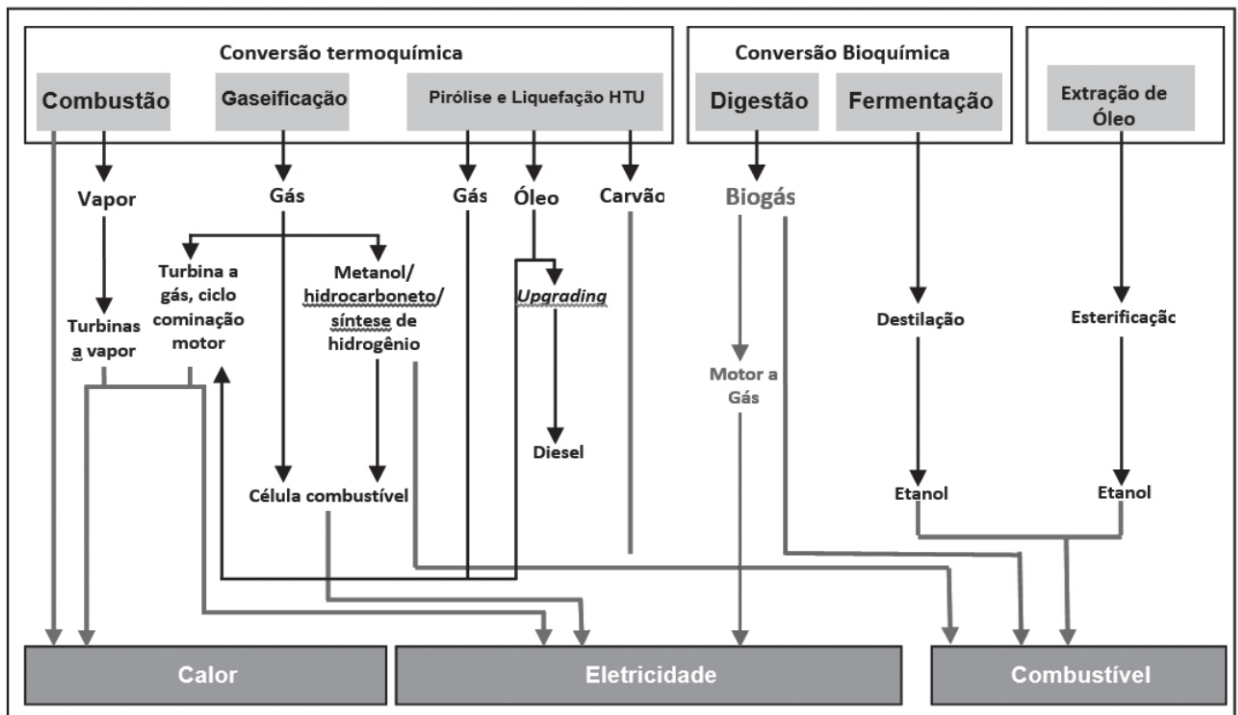
O aproveitamento da biomassa dos RSU como fonte energética induz a melhoria nas condições operacionais dos aterros de resíduos e gera receita pela obtenção de créditos de carbono e venda de eletricidade. Contribui com a redução de outros gases lançados na atmosfera, como o sulfeto de hidrogênio, que emite odor desagradável, e o monóxido de carbono e hidrogênio, que são inflamáveis (NASCIMENTO et al., 2019).

Além disso, o aproveitamento da energia a partir da biomassa de resíduos e outras fontes renováveis também pode diminuir o consumo de combustíveis fósseis e minimizar os impactos causados pela sua queima (OLIVEIRA; HENRIQUES; PEREIRA JUNIOR, 2010).

Para gerar energia a partir da biomassa podem ser usados vários sistemas, com diversas alternativas para sua aplicação. A escolha dessas alternativas é fundamentada nas variáveis institucionais, técnicas e ambientais (BRASIL, 2012), ver figura 4. Cabe observar que o biogás pode gerar tanta energia térmica, elétrica como

combustível.

**Figura 4** - Rotas de conversão da biomassa em energia



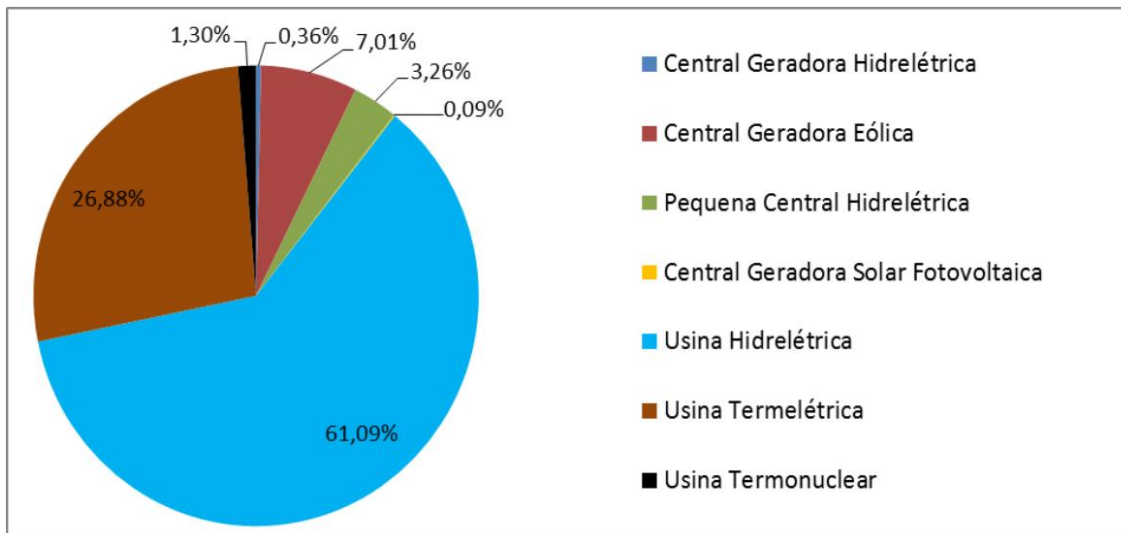
Fonte: Adaptado (BRASIL, 2012).

### 3.1.3 Hidrelétricas

Segundo Silva et al (2018), as hidrelétricas se fazem preponderante na matriz energética brasileira por ser competitiva economicamente, além de ser uma fonte de geração renovável de energia, mesmo que para isso seja necessário elevado investimento inicial para construção de projetos hidrelétricos de grande porte, o que faz com que a produção de energia a partir de resíduos sólidos ainda seja muito tímida.

Atualmente as usinas hidrelétricas são as mais utilizadas para produção de energia elétrica no Brasil (IPEA, 2012), conforme Figura 5:

**Figura 5** - Matriz energética brasileira



Fonte: SILVA et al (2018).

### 3.1.4 Solar

Para Bursztyn (2020), alguns países despertaram, recentemente, para a relevância da geração de energia renovável, como a eólica e a solar, mas ainda há relutância em disseminar tais práticas em escala planetária. Grandes interesses econômicos estão em jogo.

Ainda de acordo com este autor dogmas institucionais (lobbies de grupos econômicos influenciando políticas públicas) e profissionais (preconceitos técnicos por parte de quem aprendeu a fazer de uma forma e reage ao novo e desconhecido) funcionam como barreiras à mudança (BURSZTYN, 2020).

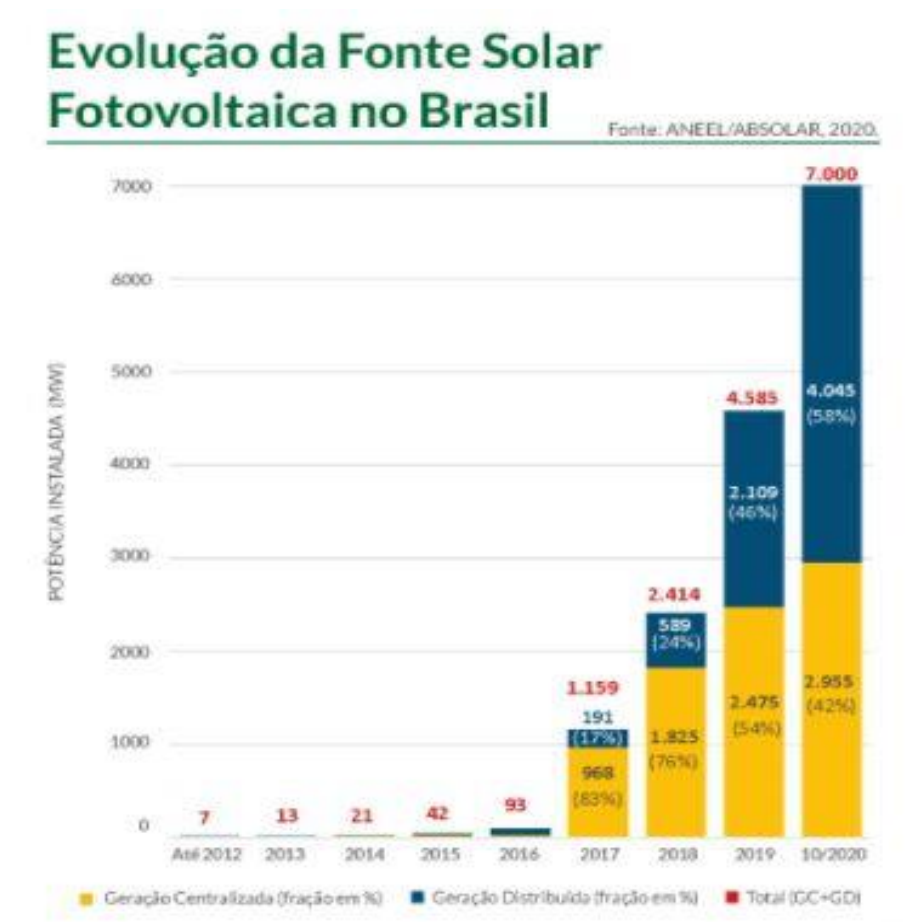
Deste modo, Bursztyn (2020) ressalta que “a crise energética, que em grande medida resulta de uma da crise hídrica, expôs o Brasil à necessidade de adotar soluções paliativas ao fornecimento de eletricidade, com a instalação de geradores termelétricos, cuja operação é cara e as emissões de carbono bem maiores”.

Para Colaferro (2021), hoje, a energia solar cresce no Brasil através dos projetos de Geração Distribuída (GD) instalados em casas, empresas etc., e na Geração Centralizada (GC) por meio de grandes usinas de energia solar (ou fazendas

solares). Por conta das enormes vantagens que oferece aos consumidores de energia elétrica, principalmente os residenciais, a tecnologia fotovoltaica vem crescendo mais rápido no Brasil dentro da GD.

De acordo com Colaferro (2021), segundo os dados da ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), são mais de 4 GW de solar distribuída contra cerca de 3 GW gerados em grandes usinas no país, ver figura 6.

**Figura 6** - Evolução da energia solar no Brasil



Fonte: Adaptada de Colaferro

O aproveitamento da energia solar é obtido por efeito fotovoltaico ou térmico. No efeito fotovoltaico (FV), a obtenção da energia elétrica ocorre pela incidência de fótons da radiação solar sobre um material semicondutor, previamente purificado e dopado. Esse semicondutor é o principal componente das tradicionais células solares, que interligadas constituem o núcleo dos chamados painéis solares (BNDES, 2018).

De acordo com (BNDES, 2018), “além de atender a demanda por eletricidade pela indústria, comércio e residências, a energia elétrica obtida pelo efeito fotovoltaico também é utilizada na produção de hidrogênio e hidrocarbonetos sintéticos, por meio da eletrólise”.

O efeito térmico solar gera o calor utilizado para o aquecimento ou resfriamento de água bem como para a geração de vapor no uso industrial ou doméstico. Pela via térmica também se produz energia elétrica através do processo denominado CSP (concentrated solar power) (BNDES, 2018).

Para Pereira et al. (2017), o aproveitamento do recurso energético solar consiste na conversão da energia emitida pelo Sol em energia térmica ou diretamente em energia elétrica (processo fotovoltaico). O uso de tecnologias de conversão de energia solar vem crescendo mundialmente a taxas elevadas, tanto para aplicações térmicas, quanto fotovoltaicas. Entre 2010 e 2016, a capacidade instalada global por sistemas fotovoltaicos cresceu em média 40% contra 16% da eólica e aproximadamente 3% da hídrica (REN21, 2017).

Segundo Pereira et al. (2017), o uso de sistemas fotovoltaicos possibilita a geração distribuída de eletricidade com plantas de pequena e média escala instaladas em edifícios residenciais e comerciais que produzem energia para consumo próprio e despacham o excedente para distribuição na rede do sistema elétrico. A geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas no Sistema Interligado Nacional (SIN) em razão da distância entre as plantas de geração e os centros consumidores.

De acordo com Pereira et al. (2017), “o aproveitamento do recurso solar no Brasil se apresenta como uma excelente opção para complementação de fontes convencionais de energia já consolidadas como as hidroelétricas”.

Ainda neste contexto, os autores abordam que o aproveitamento do recurso solar favorece o controle hídrico nos reservatórios, especialmente nos períodos de menor incidência de chuvas, e possibilita planejamento e otimização de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição da energia (PEREIRA et al., 2017).

Deste modo, no ponto de vista destes autores que a estratégia de aproveitamento da geração solar consorciada com a geração hidroelétrica permite

antever um possível processo de aumento da renda de algumas das regiões mais pobres do país, como a Região Nordeste, com a promoção de uma economia socialmente justa e menos vulnerável aos efeitos do clima, reduzindo assim uma assimetria regional secular de inclusão social e econômica (PEREIRA et al., 2017).

### **3.1.5 Eólica**

De acordo com Lopez (2002), a energia dos ventos é empregada para a movimentação de diversos engenhos do homem desde os primórdios da civilização. Há milênios essa fonte é utilizada para atividades como o beneficiamento de grãos e o bombeamento d'água, dividindo espaço com outras tecnologias como a tração animal e rodas d'água ao longo do avanço da atividade agrícola.

A origem da palavra “eólica” é do latim *aeolicus*, que se refere ao deus dos ventos da mitologia grega Éolo, conforme descreve Luna (2011). Segundo Righter (1996), o vento representa uma força primária da natureza que surge a partir de variações de temperatura e pressão do ar.

Para o Energy Information Administration (EIA, 2017), o uso do vento como fonte de energia foi a partir de 5.000 a.C., quando sua finalidade era impulsionar barcos ao longo do rio Nilo. Posteriormente, em 200 a.C., na China, Pérsia e Oriente Médio, o vento foi utilizado como energia para moinhos.

Na década de 1990, houve um crescimento acelerado no setor de energia eólica por todo o mundo. A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à produção de energia elétrica atingiu 74.223 MW em 2006, um crescimento de cerca de 20% em relação a 2005 (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

O Brasil é um país privilegiado sob o aspecto energético, pois seu relevo, hidrografia e clima tropical permitem o aproveitamento das diversas fontes renováveis de energia, como a hidráulica, biomassa, eólica e solar (AMARANTE et al., 2001; MARTINS et al., 2008; COSTA et al., 2013; SCHMIDT et al., 2016).

O Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2016b) relata que, com a tecnologia atual, já existem turbinas no exterior capazes de produzir entre 5 e 7 MW em parques

offshore – instalados no mar. No Brasil, as turbinas geram 3 MW em torres de 100 metros ou mais, em parques onshore – instalados em terra.

A profunda transformação nos processos de produção introduziu o uso em massa de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo, gás natural, etc.), caracterizados pelo alto teor energético, flexibilidade na utilização e facilidade de transporte (ALVES, 2017).

Por outro lado, o avanço das redes elétricas motivou pesquisas com o objetivo de adaptar os moinhos para a geração de eletricidade, com o primeiro aerogerador sendo desenvolvido pelo americano Charles Brush em 1888 (DUTRA, 2008).

Segundo Magalhães (2009), as mudanças políticas necessárias à viabilização da energia eólica se deram rapidamente nos países desenvolvidos, ocorrendo de forma muito mais lenta nos países subdesenvolvidos principalmente pela escassez de recursos para investimento em pesquisa e desenvolvimento.

O Brasil aparece em uma posição de destaque no que tange a composição de sua matriz energética, que é baseada principalmente na energia hidrelétrica. O Balanço Energético Nacional 2017 (EPE, 2017) atribui 68,1% da oferta interna a este tipo de energia, sendo a biomassa e a energia eólica também de grande relevância, com participação na matriz nacional de 8,2% e 5,4%, respectivamente. Assim o Brasil demonstra considerável independência de fontes não-renováveis para sua produção energética, ao contrário da tendência global.

“Os benefícios da inserção da energia eólica para a segurança da matriz elétrica brasileira são importantes devido à sua complementaridade com o regime hídrico e manutenção do caráter limpo e renovável da matriz energética brasileira” (RAMPINELLI; ROSA JÚNIOR, 2012).

O caráter renovável e o fato de não lançar poluentes para a atmosfera durante sua operação tornam a energia eólica uma das fontes mais promissoras para mitigação de problemas ambientais tanto a nível global como nacional. Entretanto, a energia eólica, como qualquer outra atividade industrial, também pode causar impactos no ambiente que devem ser considerados e mitigados (AMPONSAH et al., 2014).

## **4 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RSUS**

O significado da palavra resíduo envolve vários elementos que, avaliados como inúteis pelo homem, perderam seu valor e utilidade, por isso também são considerados lixo. Os resíduos gerados podem ser sólidos e líquidos, mas esta pesquisa concentrará sua atenção apenas aos resíduos sólidos (GALIZA; CAMPOS, 2015).

A ABNT NBR 10004: 2004 conceitua RSU como resíduos nos estados sólido e semissólido, que derivam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluem-se nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis diante da tecnologia disponível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

De acordo com pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração de RSU no Brasil foi de 76.387.200 toneladas no ano de 2013 e 209.280 toneladas diárias. Esse número representou um crescimento de 4,1 % quando comparado com o ano de 2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013).

### **4.1 TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RSUS**

Em 2014, o Brasil gerou cerca de 219 mil toneladas diárias de RSU (ABRELPE, 2015) e, portanto, cerca de 114 mil t/dia de resíduos orgânicos que foram confinados em aterros de resíduos, tornando-os grandes potenciais para a exploração de biogás e conseqüente fonte alternativa renovável para a geração de energia elétrica e/ou térmica. Segundo Reichert (2014), cada tonelada de resíduo disposto possui potencial energético da ordem de 0,1 a 0,2 MWh.



Entretanto, em meio aos problemas com a destinação final dos RSU, atualmente alternativas têm sido empregada desde a década de 1970, garantindo assim a conversão de energia tendo resíduos como insumo. Processos como a incineração dos resíduos sólidos, por meio de tratamento térmico e, através de um tratamento biológico, como a produção do biogás, são processos capazes de transformar o RSU em energia (LIMA, 2017).

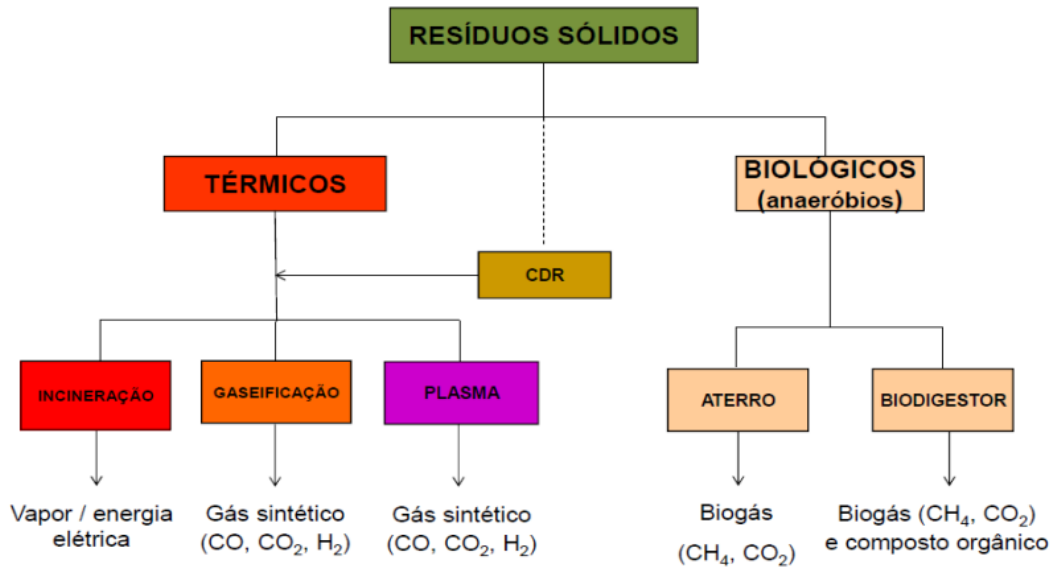
O aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia é uma estratégia que vem sendo utilizada em todo o mundo e, mais recentemente no Brasil. Estes recursos apresentam uma série de benefícios para os países, seja pela diminuição dos impactos causados ao meio ambiente, seja pelas questões sociais e econômicas (LIMA, 2017).

Furtado e Serra (2009), avaliando as tecnologias que utilizam os RSU para geração de energia elétrica, mostram que há diversas opções de rotas tecnológicas, tais como o térmico e o biológico. No processo térmico, em que se utiliza a incineração para recuperação energética, o objetivo da tecnologia é reduzir significativamente o volume de resíduos e aproveitar, através da combustão, o calor dos gases para gerar energia elétrica. Enquanto o biogás pode conter entre 40 e 80% de metano, dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação.

Na Figura 7, pode-se verificar as rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU, a qual mostra o panorama acerca do aproveitamento energético dos RSU.

Assim, de acordo com Lima (2017), “a composição dos RSU constitui fator determinante na definição de qual tecnologia será de aplicada para o aproveitamento energético destes”.

Figura 7 - Rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU



Fonte: Adaptado de Lima (2017)

No quadro 1, pode-se observar as principais tecnologias para o gerenciamento dos resíduos sólidos. Mas adiante serão detalhadas algumas dessas tecnologias utilizadas, que em alguns casos poderão ser usadas na geração de energia elétrica.

Quadro 1 - Tecnologias para o gerenciamento de resíduos

<b>Coleta</b>	<p><b>Sistema de coleta subterrânea</b> – Armazenamento subterrâneo e semi-subterrâneo de resíduos, usado para materiais recicláveis, orgânicos e óleos. Indicado para regiões com temperaturas elevadas, devido à temperatura relativamente baixa no subsolo. Exige menos manutenção.</p> <p><b>Sistema de informação geográfica (SIG)</b> – Permite gerenciar todo o ciclo de resíduos, da coleta ao aterro ou central de reciclagem e tratamento. Com etapas automatizadas e rastreabilidade, fornece informações como rotas mais confiáveis e número de residentes.</p>
---------------	---

<b>Segregação e classificação</b>	<p><b>Caixas multi-compartimentos</b> – Caixas com compartimentos para diferentes tipos de resíduos, como orgânicos e recicláveis, usadas para segregar o resíduo do local de sua geração até o destino final.</p> <p><b>Sistemas de triagem automatizados</b> – incluem o uso de sensores ópticos e de UV, câmeras e em alguns casos espectroscopia de infravermelho para a identificação e classificação da composição dos resíduos, como plásticos, vidros, metais, incluindo a segregação de forma automatizada, elevando a taxa de recuperação de produtos descartados, com baixo custo de operação.</p> <p><b>Tratamento Biológico Mecânico</b> – Pré-tratamento ao transporte e segregação, combina os processos biológicos, para minimizar o teor de água, e o processo mecânico, para separar metais e vidros dos demais resíduos.</p>
-----------------------------------	---

<b>Reciclagem</b>	<p><b>Biodegradação de plásticos</b> – Permite que o plástico seja degradado fisicamente em 90%, dependendo das condições de degradação, com controle dos componentes químicos presentes no plástico biodegradável, para evitar a contaminação do solo.</p> <p><b>Remanufatura de vidro</b> – Voltada para remanufatura por derretimento, pode redirecionar o material resultante para a produção de materiais para construção ou como matéria-prima para isolamento.</p> <p><b>Deinking Technology</b> – Usada para reciclagem de papel, torna possível remover tinta da pasta obtida de papel branco e colorido, e recuperar a celulose para uso na indústria.</p>
-------------------	--

<b>Processamento</b>	<p><b>Autoclavagem</b> – Envolve esterilizar resíduos com vapor a 140-160°C para separá-los com base em peso e composição dos materiais (vidro, metais, plásticos e fibra orgânica) para reaproveitamento na indústria ou armazenamento em aterros.</p> <p><b>Fluffing</b> – Permite separar e esterilizar resíduos sólidos e processar a porção orgânica, formando uma polpa conhecida como fluff, enquanto trituradores reduzem o tamanho do papel, metal e vidro. O vapor de alta temperatura quebra ligações moleculares e destrói patógenos, originando um material celulósico granulado, usado para reduzir volume de aterros ou corrigir solos.</p> <p><b>Incineração</b> – Tratamento térmico, geralmente a 850°C, em que o material resultante da combustão é transformado em água e gás carbônico, podendo ser usado como combustível, com o devido tratamento ambiental.</p> <p><b>Fusão</b> – Permite derreter resíduos com o uso de eletricidade ou combustão de combustível em aproximadamente 1.400°C, reduzindo seu volume. O resíduo solidificado tem aplicações na indústria, na construção civil e na recuperação de solos.</p> <p><b>Vermicompostagem</b> – Processamento de resíduos de origem animal, farmacêuticos, de alimentos e esgotos por minhocas, originando um material rico em nitrogênio, fosfato e potássio, direcionado para uso como biofertilizante na agricultura.</p>
----------------------	--

<b>Recuperação energética</b>	<p><b>Conversão Térmica</b> – Utiliza água, calor ou pressão para converter resíduos orgânicos e inorgânicos em produtos químicos e compostos. Plásticos, pneus e resíduos são submetidos a processamento térmico, convertendo-se em moléculas de gás combustível e óleo. Metais pesados são convertidos em óxidos.</p> <p><b>Pirólise</b> – Degradação térmica de materiais na ausência de oxigênio que converte resíduos em combustíveis líquidos ou gasosos, a uma temperatura entre 300°C e 800°C. Gases e líquidos volatilizados são usados para operar motores a vapor.</p> <p><b>Gaseificação</b> – É útil na manutenção da sustentabilidade de aterros. A matéria-prima é alimentada em gaseificadores com quantidade limitada de ar, resultando em vapor, produtos químicos, eletricidade, hidrogênio, fertilizantes e gás natural.</p>
-------------------------------	--

Fonte: Adaptada de IPEA 2020

## 4.2 PROCESSOS DE INCINERAÇÃO

De acordo com CEMPRE (2010), tratamento térmico de resíduos é todo processo de aquecimento utilizado para reduzir a periculosidade e/ou massa de um material a fim de propiciar sua destinação final em aterros.

Os tratamentos térmicos podem ser classificados como: de alta temperatura (acima de 500°C): visam a remoção dos compostos orgânicos, redução da massa e volume dos resíduos; de baixa temperatura (em torno de 100°C): visam a assepsia dos resíduos, sendo geralmente empregados para resíduos de saúde (RSS) (CEMPRE, 2010).

A incineração promove a geração de cinzas inertes, isentas de matéria orgânica e inorgânica combustível, como resíduo do processo e, para que isso acontece é necessária a manutenção de elevada temperatura em fornos, que na presença de oxigênio em excesso, é capaz de promover a queima de resíduos combustíveis (MACHADO, 2015, p.13).

As cinzas provenientes do processo de incineração possuem alta concentração de componentes metálicos, por isso não é conveniente seu descarte no solo. Nesse sentido, com as tecnologias atuais as cinzas já podem ser reincineradas com aplicações na fabricação de produtos cerâmicos (LIMA, 2017).

A incineração é um processo de combustão controlada, que tem como princípio básico a reação do oxigênio com componentes combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperatura superior a 800 °C, convertendo sua energia química em calor (LIMA, 2017).

Dentre os tratamentos de alta temperatura mais difundidos está o processo de incineração, que faz uso de agente oxidante (normalmente o ar) e ocorre acima de 800°C. Na incineração ocorre a combustão da fração orgânica dos resíduos gerando, principalmente, gás carbônico (CO<sub>2</sub>), água e cinzas (CEMPRE 2010).

Existem outros processos a alta temperatura (ex.: pirólise, gaseificação e liquefação) que se dão geralmente em torno de 600°C, onde ocorre a decomposição térmica da fração orgânica, gerando gases, líquidos e sólidos combustíveis (CEMPRE 2010).

### 4.2.1 Gaseificação

Para Sobrinho (2017), para entender alguns aspectos que tornam a gaseificação uma tecnologia interessante para a geração de energia é importante ressaltar que a gaseificação é também chamada de combustão estagiada ou combustão incompleta, já que o gás produzido será queimado numa etapa posterior (caldeira e motogeradores).

A distribuição (transporte) é mais fácil devido ao produto final ser um gás combustível, o mesmo pode ser transportado através de tubulações para grandes distancias, sem a necessidade da construção da usina no local de consumo (INFIESTA, Luciano Reis, 2015, pg. 44 e 45).

A gaseificação trata-se de combustão limpa, pois a grande parte das impurezas (material particulado) é removida do gás por ciclones, além de uma combustão mais eficiente, facilidade na mistura ar-combustível, assim como no fornecimento da quantidade ideal de ar necessária para a queima do gás de síntese (INFIESTA, Luciano Reis, 2015, pg. 44 e 45).

A gaseificação pode ser definida como oxidação parcial, à elevada temperatura 500 °C – 1400 °C e pressão variável (atmosférica a 33 bar), de material carbonáceo sólido ou semissólido (biomassa/madeira, resíduos, carvão, etc.), em um gás combustível (gás de síntese, principalmente H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO). Durante a gaseificação, o produto principal é um gás combustível composto de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias - pequenas partículas de coque, cinza, alcatrão, ácidos e óleos, que são consideradas contaminantes (SOBRINHO, 2017).

A composição desse gás de síntese varia em função do tipo de biomassa e do processo de utilizado. Os processos de gaseificação mais simples utilizam o ar como agente gaseificante, neste caso o uso de ar, ao invés de oxigênio, cujo alto valor de mercado inviabiliza esta prática, pode reduzir o poder calorífico do produto gasoso devido à presença de dióxido de carbono e nitrogênio (INFIESTA, Luciano Reis, 2015, pg. 44 e 45).

O processo de gaseificação é composto por reações complexas, ainda não inteiramente conhecidas, porém pode ser simplificado em três etapas principais: a etapa de secagem, a etapa de pirólise e a etapa de gaseificação, em que ocorre a

oxidação parcial dos resíduos e gases voláteis produzidos na etapa de pirólise. (INFIESTA, Luciano Reis, 2015, pg. 44 e 45).

Atende dois modelos diferentes de geração: ciclo Otto e o ciclo Rankine; ou seja, o gás gerado poderá ser utilizado como combustível diretamente em motores, de ciclo Otto, onde a explosão interna aciona geradores acoplados ou diretamente em combustores do tipo caldeiras aquatubular e turbogeradores, acionados pelo vapor gerado pelo processo (SOBRINHO, 2017).

A melhor eficiência no aproveitamento energético está no ciclo Otto com 35%, mas sua viabilidade econômica é limitada a 2 MW. Para a geração de potências superiores a 2 MW, a utilização do ciclo Rankine com rendimento de 30%, torna-se a opção mais viável economicamente para a geração elétrica na utilização de gaseificadores, devido ao ganho de escala e conseqüentemente ao menor investimento R\$/MW instalado. (CARBOGAS, 2014).

#### **4.2.2 Pirólise**

A tecnologia de pirólise promove a quebra das moléculas dos resíduos sólidos através do superaquecimento, porque a pirólise “é um processo de decomposição térmica, na ausência de oxigênio, por fonte externa de calor, que converte a matéria orgânica em diversos subprodutos” (FEAM, 2012, p.31).

De acordo com Lima (2017), neste processo, o fracionamento das substâncias sólidas ocorre progressivamente à medida que estas passam pelas zonas de calor que integra o reator pirolítico. E na zona pirolítica o calor pode variar de 300 °C a 1.600 °C, porque ocorrem os processos de volatilização, oxidação e fusão, resultando em:

- Gases não condensáveis, compostos principalmente por nitrogênio e gás de síntese (syngas);
- Líquido pirolenhoso, obtido pela condensação de gases que se desprendem durante o processo, com baixo teor de enxofre, composto por ácido pirolenhoso (ácido acético, metanol, alcatrão solúvel e outros vários compostos em menor quantidade) e alcatrão insolúvel;
- Resíduo sólido, constituído por carbono quase puro (char) e ainda, por vidros, metais e outros materiais inertes (escória) caso presentes no RSU processado (FEAM, 2012, p.31).

A pirólise tem potencial de produzir até 75% da biomassa em uma mistura de líquidos (alcatrões, hidrocarbonetos oxigenados, ácidos orgânicos, etc.), sendo o processo realizado em três tipos, nomeadamente: pirólise convencional, rápida e ultrarrápida, conforme o tempo de residência da matéria-prima no forno e a temperatura do processo (LIMA, 2017).

No processo de pirólise, o reator pirolítico é o equipamento principal, sendo disponibilizado no mercado vários modelos, destacando-se os de leito fluidizados (borbulhante e circulante), os de leito fixo, leito de jorro, cilindro rotativo, reator ciclônico, cone rotativo e dentre outros (LIMA, 2017).

Neste processo, o líquido pirolenhoso pode ser gaseificado ou refinado para uso energético e, dependendo da concentração de alcatrão e outros compostos tóxicos, pode ser utilizado na agricultura, entretanto o líquido é corrosivo, nocivo e altamente poluente (FEAM, 2012).

Os gases não condensáveis, resultantes da pirólise podem ser utilizados para: a produção de vapor através de trocadores de calor e caldeiras ou, após resfriamento e limpeza em sistema de controle de emissão, podem ser queimados em caldeiras, turbinas a gás ou motores de combustão interna, para geração de eletricidade ou destinados à fabricação de produtos químicos (FEAM, 2012, p.32).

A carbonização da madeira para a produção do carvão vegetal, requer, portanto, algumas exigências técnicas da pirólise, dentre as quais destaca-se:

- tipo, umidade, forma e dimensão da matéria-prima;
- temperatura final da reação;
- taxa de aquecimento e tempo de permanência na temperatura final; • adição de catalisadores;
- atmosfera de reação (inerte ou parcialmente inerte);
- técnica utilizada (fonte de energia);
- qualificação do operador (processos artesanais);
- pressão (rendimento e cinética das reações) (FEAM, 2012, p.33).

Tecnologias que utilizam o processo de pirólise rápida podem produzir combustíveis líquidos para serem utilizados em substituição aos óleos combustíveis usados no aquecimento e na geração de energia elétrica (WANG et al., 2011), como se pode comprovar nos estudos desenvolvidos por Qi et al. (2007). O balanço energético do sistema de pirólise é sempre positivo, pois produz mais energia do que

consome, ou seja, é autossuficiente.

Dentre as tecnologias disponíveis e adequadas no mercado, o tratamento térmico por pirólise recebe destaque por reduzir o volume do resíduo em até 90%, além de possibilitar o fornecimento de matérias primas em vários segmentos industriais. Observa-se que a incineração é a forma de disposição final mais utilizada para extinção de resíduos classificados como perigosos (classe I) (SOBRINHO, 2017).

Entretanto, essa forma de tratamento mesmo que adequada e de acordo com as diretrizes estabelecidas na legislação ambiental, apresenta um impacto ambiental considerável em função das emissões de gases de efeito estufa (OLIVEIRA, 2009), por este motivo optamos pelo processo de Pirólise.

Wiggers (2003) cita que a pirólise, uma das muitas alternativas de processos de conversão química de resíduos sólidos, tem recebido uma atenção especial pelas suas vantagens ambientais. Sofrendo aquecimento em uma atmosfera empobrecida de oxigênio, as substâncias orgânicas de cadeia longa, os polímeros de origem biológica ou sintéticos, fracionam-se via craqueamento térmico e reações de condensação, gerando produtos finais na forma de frações gasosas e líquidas de menor peso molecular e o resíduo sólido final carbonizado, todos com potencial valor econômico.

Ao contrário da incineração, que é altamente exotérmica, a pirólise constitui-se de um processo inicialmente endotérmico, ocorrendo comumente numa faixa de temperatura da ordem de 300o a 600°C e apresenta vantagens, tal como o menor risco potencial de formação de dibenzodioxinas e dibenzofuranos policlorados (WIGGERS, 2003).

Assim sendo, segundo Sobrinho (2017), a aplicação do processo de pirólise em resíduos sólidos urbanos possui potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, pois o gás metano deixa de ser gerado em qualquer utilização posterior dos produtos do processo, além da possibilidade do incremento da geração de energia de origem renovável.

Vários autores citam o uso da pirólise no tratamento de resíduos sólidos contendo matéria orgânica (BENTO, 2004), resíduos plásticos (GONÇALVES, 2007), resíduos perigosos (GIARETTA, 2007), biomassa (MESA et al., 2003), pneus (GARCIA et al., 2007), para citar alguns estudos.



No caso dos resíduos sólidos urbanos, Martins et al. (2007) consideram a pirólise como alternativa promissora de tratamento, em virtude das enormes quantidades de resíduos sólidos urbanos gerados mundialmente e do indesejável impacto ambiental consequente.

## **5 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS (CDR)**

### **5.1 BIOGÁS**

O biogás de aterro sanitário é uma técnica de aterramento dos resíduos sólidos urbanos que consiste na decomposição de material orgânico presente nos resíduos (LIMA, 2017).

A produção de energia por meio do biogás do lixo permite a geração de uma energia renovável e limpa, reduz a emissão de gases que causam o efeito estufa e favorece a obtenção de receitas por meio de créditos de carbono (MAIER; OLIVEIRA, 2014).

De acordo com a FEAM (2012, p.58), a produção do biogás de aterro baseia-se na compactação dos resíduos no solo na forma de camadas, periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, de modo a produzir uma degradação natural e lenta, por via biológica, até a mineralização da matéria biodegradável. O biogás pode ser utilizado na geração de energia elétrica, através de geradores.

A geração de energia a partir do biogás de aterro sanitário difere de outros procedimentos termelétricos, pois é necessário seu processamento, que irá variar em função da utilização do gás. Neste processo:

O biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético. A maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos, onde é mantida acesa uma chama para queima imediata do biogás que vai sendo naturalmente drenado. Esse sistema apresenta uma baixa eficiência e estima-se que apenas 20% do biogás seja efetivamente destruído pela queima. O restante é emitido para a atmosfera (FEAM, 2012, p.59).

Este processo carece cuidados especiais e técnicas específicas a serem

seguidas, desde a seleção e preparo da área, até sua operação e monitoramento. Assim, a coleta do biogás em aterros sanitários requer o prévio planejamento da instalação dos equipamentos destinados a esse fim (LIMA, 2017).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2014), a técnica consiste em aproveitar o biogás gerado a partir da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU, devido à ação de micro-organismos que transformam esses resíduos em substâncias mais estáveis, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), água, gás metano ( $\text{CH}_4$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), mercaptanas e outros elementos minerais.

Neste caso, o principal componente do biogás é o metano ( $\text{CH}_4$ ), que é aproximadamente vinte vezes mais poluente que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em se tratando de efeito estufa. Por esse motivo, só a queima desse gás já representa um benefício ao meio ambiente; salienta-se que boa parte das empresas que trabalham com o tratamento de resíduos realiza o procedimento da queima em *flare* (MAIER; OLIVEIRA, 2014).

Esse procedimento também evita explosões e a emissão direta de metano para a atmosfera. "Em adição, o aproveitamento energético também evita a emissão decorrente da queima de combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás" (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014, p. 17).

Sousa, Gaia, Rangel (2010, p.378), apresenta como vantagens nesse processo, o baixo custo de obtenção, a menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos) e, o menor risco ambiental. Porém, há desvantagens, tais como: Baixa densidade energética; necessita de equipamentos adequados para sua manipulação, a fim de evitar impactos ambientais ou a saúde das pessoas envolvidas nas operações; sua composição química possibilita o aparecimento de corrosão, sendo necessário usar materiais resistentes à corrosão nas máquinas movidas a biogás.

Embora, o processo confira comprovados benefícios ambientais, "uma vez que possibilita a captura e uso do metano – principal gás causador do "efeito estufa" – que de outra forma seria lançado na atmosfera" (FURTADO, SERRA, 2009), no Brasil a produção desse tipo de energia representa apenas 2% da energia de nosso país.

Contudo, a produção de biogás constitui o grande grupo das tecnologias baseadas em tratamentos térmicos dos RSU, as quais podem ainda assumir combinações com vários tipos de pré-processamento do resíduo e mesmo uma composição entre elas (FURTADO, SERRA, 2009).

No Brasil, a primeira iniciativa de aproveitamento de biogás para produzir biometano ocorreu na década de 1970, na cidade do Rio de Janeiro, no antigo lixão do Caju, que foi operado de 1935 a 1977 (42 anos), acumulando cerca de 30 milhões de metros cúbicos de RSU em uma área de um milhão de metros quadrados (NASCIMENTO et al., 2019).

O sistema foi implantado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Estado do Rio de Janeiro (COMLURB), que recuperou cerca de 20 milhões de metros cúbicos de biogás, injetando-o na rede de gás natural da Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG). Em 1980, passou a abastecer parte da frota da COMLURB (MUYLAERT, 2000).

Posteriormente, somente em 2014, surgiram duas outras iniciativas para produzir biometano, também localizadas no Estado do Rio de Janeiro, provavelmente em decorrência da Política Estadual de Gás Natural Renovável (GNR), que obriga as concessionárias de distribuição de gás canalizado a adquirirem, de forma compulsória, todo o GNR produzido no Estado, até o limite de 10% do volume de gás natural convencional (AGENERSA, 2012). A primeira a entrar em operação foi a Usina de Gás Verde Gramacho e, em seguida, a Usina de Tratamento de Biogás Dois Arcos.

A Usina de Gás Verde Gramacho, operada pela Gás Verde S.A., iniciou suas atividades em maio de 2014, enviando diariamente cerca de 49 mil metros cúbicos de biometano à Refinaria Duque de Caxias (REDUC), da Petrobras. O investimento para a implantação do sistema de purificação do biogás e transporte foi de R\$ 90 milhões (PETRONOTÍCIAS, 2014).

Ela aproveita o biogás gerado no aterro Metropolitano de Gramacho, considerado o maior aterro de resíduos da América Latina, que funcionou de 1978 a 2012, acumulando 80 milhões de toneladas de RSU em uma área de um milhão de metros quadrados de manguezal (RIO DE JANEIRO, 2014).

A Usina de Tratamento de Biogás Dois Arcos, operada pelas empresas OSAFI

e Ecometano, produz em média oito mil metros cúbicos diários de biometano, que são enviados à Rede de Supermercados Guanabara, em Itaguaí (RJ). Há previsão de ampliação do sistema, que proporcionará a produção de 15 mil metros cúbicos (SBERA, 2015), os quais serão injetados na rede da Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro (CEG-Rio) (EcoDebate, 2015). Ela explora o biogás gerado no aterro sanitário Dois Arcos, que funciona desde 2008, e dispõe em média 700 t/dia de RSU (FEEMA, 2009).

Embora o governo brasileiro tenha criado o Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), por meio da Lei Federal nº 10.438/2002 (BRASIL, 2002), o País tem poucos projetos implantados para a geração de energia elétrica a partir do biogás, sendo que a maioria dos existentes faz parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (BARIN, 2012).

No Brasil, entre 2004 e 2015, o biogás gerado nos aterros de resíduos foi explorado em 9 termelétricas, que produziram juntas 86,6 MW de energia elétrica, em duas usinas, que geraram 57 mil metros cúbicos diários de biometano, e em três aterros sanitários, que o utilizam como fonte de calor para a evaporação do lixiviado (NASCIMENTO et al., 2019).

O Balanço Energético Nacional de 2015 mostra que, em 2014, a capacidade instalada de energia elétrica oriunda de fontes renováveis foi de 133.914 MW (EPE, 2015), sendo que 12.686 MW corresponderam à gerada a partir da biomassa (agroindustriais, óleos vegetais, florestas, resíduos animais e RSU) (ANEEL, 2015).

Destaca-se a utilização do metano presente no biogás, que, além de representar uma importante fonte alternativa de geração de energia, deixa de ser lançado na atmosfera, uma vez que é considerado um importante gás de efeito estufa (GEE). Se comparado ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), possui potencial de aquecimento global 28 vezes superior, considerando o período de 100 anos (IPCC, 2014).

A produção de metano depende das características dos RSU (composição, tamanho das partículas, umidade, temperatura e pH) e das técnicas de implantação e operação dos locais de disposição final. Ensaio realizados nos aterros sanitários de Caieiras e Santo André, ambos localizados no Estado de São Paulo, mostram que a produção de metano por tonelada de RSU foi de 99,69 m<sup>3</sup> (PECORA; VELAZQUÉZ;

COELHO, 2010).

## 5.2 Digestão Anaeróbica

A recuperação energética dos RSO é possível tanto por tratamentos físico-químicos, como pirólise, gaseificação; quanto por tratamentos biológicos, como os sistemas metanização por meio da digestão anaeróbia controlada. Sistemas de metanização realizam o processo de digestão anaeróbia em um reator, controlando os parâmetros operacionais e ambientais adequados para favorecer as reações bioquímicas envolvidas no processo (DE BAERE, 2006; JINGURA; MATENGAIFA, 2009).

Os reatores anaeróbios criam as condições ideais que permitem uma taxa alta e contínua de carga orgânica em um curto tempo de detenção hidráulica e produção máxima de biogás com altas concentrações de metano (CH<sub>4</sub>). Devido às diversas formas de utilização energética do biogás, a digestão anaeróbia pode ser considerada não somente como uma opção de tratamento biológico dos RSO, mas também como um processo sustentável pela capacidade de geração da energia térmica e elétrica (DE BAERE, 2006; JINGURA; MATENGAIFA, 2009).

De acordo com Raposo et al. (2011), a digestão anaeróbia é em um processo bioquímico, utilizado para o tratamento de substratos orgânicos como lodo de esgoto, dejetos de animais e resíduos orgânicos. O processo consiste na degradação e estabilização na matéria orgânica complexa por um consórcio de microrganismos, produzindo o biogás, que pode ser usado como uma fonte de energia renovável.

“A digestão anaeróbia ocorre em etapas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A microbiologia desse processo envolve um ecossistema que envolve vários grupos de microrganismos” (PARK et al., 2008; ASLANZADEH et al., 2014).

No entanto, o processo ocorre basicamente em dois estágios: no primeiro, compostos orgânicos complexos são degradadas a produtos intermediários e substratos diretos da metanogênese por meio da solubilização hidrolítica e acetogênica e, no segundo estágio, os produtos intermediários também são convertidos a substratos diretos da metanogênese, por meio da acetogênese, e, por

fim, ocorre a metanogênese (PARK et al., 2008; ASLANZADEH et al., 2014).

Diferentemente da oxidação aeróbia, que necessita de oxigênio e o crescimento dos microrganismos é rápido, onde grande porção de matéria orgânica é convertida em novas células, a digestão anaeróbia produz relativamente pouca energia aos microrganismos. Assim, sua taxa de crescimento é lenta e apenas uma pequena porção da matéria orgânica é convertida em células novas, sendo a maior parte dela convertida em gás metano (PARK et al., 2008; ASLANZADEH et al., 2014).

De acordo com (CHERNICHARO, 2007) O biogás é composto principalmente pelos gases metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), e a quantidade de cada gás é determinada pela composição do substrato digerido. O biogás geralmente contém 55-65% de CH<sub>4</sub> e 35-45% de CO<sub>2</sub>.

Outros componentes como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), hidrogênio (H<sub>2</sub>), amônia e composto orgânicos voláteis geralmente compõe menos de 1% do biogás. Além do biogás, o resíduo da digestão anaeróbia, conhecido como digestato, pode ser usado como fertilizante de solo após pós-tratamento, ou pode ser aterrado ou incinerado (ANGELIDAKI; BATSTONE, 2010).

### **5.3 Tecnologia de Plasma**

No tratamento de RSU utilizando a tecnologia de plasma há o aquecimento de gases no qual após serem triturados e superaquecidos, os resíduos já em forma gasosa passam por uma altíssima corrente elétrica, a qual transforma esse material em plasma (devido à alta temperatura) (FEAM, 2012, p.39).

O plasma, conhecido como “o quarto estado da matéria”, é um gás ionizado, com boa condutividade elétrica e alta viscosidade, gerado pela dissociação das moléculas de qualquer gás devido à perda de parte dos elétrons quando a temperatura de aquecimento atinge 3.000 °C. O jato de plasma é gerado e controlado em um dispositivo denominado “tocha de plasma”, no qual ocorre a formação de um arco elétrico, através da passagem de corrente entre o cátodo e ânodo, provocando a ionização do gás injetado pelo seu aquecimento a temperaturas extremamente elevadas, variando de 5.000 °C a 50.000 °C de acordo com as condições de geração, mas tipicamente da

ordem de 15.000 °C (FEAM, 2012, p.39).

Existem essencialmente dois tipos de tratamento de resíduos por plasma: incidência da tocha de plasma diretamente sobre os resíduos produzindo a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples (syngas), com maior consumo de energia e; incidência da tocha de plasma sobre os gases de síntese procedentes do processo de gaseificação de resíduo, contribuindo para a produção de um gás mais limpo (LIMA, 2017).

Na gaseificação com plasma a fonte de calor do reator é feita através de tochas de plasma que cria um arco elétrico e produz um gás a alta temperatura (LIMA, 2017).

De acordo com FEAM (2012), embora a tecnologia de plasma para resíduos sólidos urbanos, ainda não tenha alcançado desenvolvimento industrial, há avanços tecnológicos nesse processo. Hoje, existem basicamente dois tipos de tratamento de resíduos por plasma:

- Incidência da tocha de plasma diretamente sobre os resíduos produzindo a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples (syngas), com maior consumo de energia;
- Incidência da tocha de plasma sobre os gases de síntese procedentes do processo de gaseificação de resíduo, contribuindo para a produção de um gás mais limpo. O resíduo é alimentado em uma câmara de gaseificação, por meio de um sistema de câmaras estanques. Ar pré-aquecido, enriquecido ou não com oxigênio, é injetado na base da fornalha para alimentar a combustão (FEAM, 2012, p.40).

O material não combustível é descarregado pela base, como escória líquida ou metal a cerca de 1.450 °C, enquanto o gás sai pelo topo do gaseificador entre 600 °C e 800 °C, sendo conduzido para a câmara de refino (reator de decomposição térmica a plasma), onde os hidrocarbonetos presentes no gás são decompostos e parcialmente oxidados para produzir um gás combustível limpo a cerca de 1.200 °C e 1.400 °C, tendo basicamente syngas. (FEAM, 2012, p.40).

A tocha de plasma é um dispositivo que transforma energia eléctrica em calor

transportado por um gás. A tocha de plasma é responsável pela fonte de calor do reator, o qual cria um arco elétrico e produz um gás a alta temperatura de cerca de 15.000°C (LIMA, 2017).

Em síntese, Torres e Bajay (2015), cita como tecnologias de tratamento térmico de resíduos, com aproveitamento energético, a incineração, pirólise, gaseificação, plasma. Enquanto as tecnologias para tratamento biológico de resíduos com aproveitamento energético são decorrentes da utilização do biogás procedente de biometanização de resíduos em reatores anaeróbios, ou em aterros sanitários.

## **6 GESTÃO DE RSUs PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA NO BRASIL**

O Brasil possui grande potencial energético a partir dos resíduos sólidos e a alternativa poderia aumentar a atual oferta do país em 50 milhões de megawatt-hora por ano, o que representa mais de 15% do total atualmente disponível ou cerca de um quarto do que gera a usina hidrelétrica de Itaipu. Além da redução dos aterros sanitários e lixões, menor produção de gases poluentes, menos riscos ao meio ambiente e à saúde humana, mais economia e mais empregos são apenas algumas delas (SOUSA; GAIA; RANGEL, 2010).

De acordo com Costa e Abreu (2018), o Brasil, devido ao modelo de produção de energia baseado em hidrelétricas, apresenta limitações nas fontes de pesquisa e tecnologia, barreiras regulatórias relacionadas a fontes de energia renováveis. Dessa forma, não há grandes incentivos à novas formas de produção de energia.

Ressaltando ainda o fato de que por se tratar de uma temática relativamente nova, comparada a Europa e América do Norte, investimentos em energia renovável, em sua maioria, apresentam uma demanda menor em incentivos se confrontada aos necessários para adoção de fontes de energia tradicional (COSTA; ABREU, 2018).

Segundo Pavan (2010), “os impactos ambientais e sociais causados pelas fontes de energias tradicionais têm levado o poder público, privado e a comunidade científica a pensarem em novas alternativas para a geração de energia”.

Além do que, os benefícios quanto ao aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) podem ser enumerados, destacando-se a geração



de emprego, transferência de tecnologia, substituição de combustíveis fósseis e mitigação de gases de efeito estufa (PAVAN, 2010; MARTINS; SILVA; CARNEIRO, 2016).

Para Campos e Galiza (2016), mesmo diante dos presentes benefícios a dificuldade de maiores investimentos neste seguimento, além dos já citados, está relacionado tanto a legislação aplicada para geração de energia renovável quanto a que regula RSU por serem recentes e ainda estarem em processo de melhoria.

No entanto, o século XX é marcado pela expansão tecnologia e oferta de produtos em virtude da globalização, fazendo com que seja necessário se buscar novas fontes energéticas, além de se gerir de forma mais eficiente as toneladas de resíduos produzidos diariamente no Brasil (CAMPOS; GALIZA, 2016).

De acordo com o estudo de Yu et al. (2019), a energia proveniente de resíduos é um método adequado de gestão de resíduos, além de ser importante para produção de energia renovável. Segundo o estudo, já se realizava a reciclagem de 57% do lixo doméstico, 26% dos que eram de aterros e os 17% restantes incinerados, principalmente para produção de calor.

De acordo com Scarlat, Dallemand e Fahl (2018) Também trazem como elementos positivos da recuperação de energia a partir dos RSU a possibilidade de obter uma fonte de energia local, redução de depósito de resíduos em aterros sanitários, podendo ainda contribuir com a diminuição nas emissões globais de Gases do Efeito Estufa (GEE) através de uma melhor gestão de resíduos sólidos por meio da reciclagem e recuperação de energia.

Além do que, a produção de energia por meio da matéria prima reciclada dos resíduos promove a produção de energia renovável, desempenhando um papel cada vez mais importante na gestão sustentável dos RSU a nível global (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018).

No processo de gestão dos resíduos a melhor alternativa para descartá-los é reciclá-los e reutilizá-los. O que não puder ser reutilizado e reciclado deve ser usado na recuperação de energia, sendo que o seu potencial energético dependerá de fatores como o tipo de resíduos, disponibilidade financeira, aspectos ambientais, potencial de resíduos no setor de energia renovável, tecnologias disponíveis, e seu impacto ambiental (AZEVEDO, 2015).

A pesquisa de Vaish et al. (2016) deixa claro o potencial de energia presente na biomassa proveniente dos RSU na China, Japão, Malásia, Suécia, entre outros

países que se destacam pelo potencial de geração de energia armazenada nos resíduos.

No Brasil a lei no 12.305/2010 caracterizada como a Política Nacional de Resíduos Sólidos é um marco importante no avanço das políticas ambientais, pois regulamenta mudanças na gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e, estabelece o destino correto dos resíduos sendo como uma das principais metas, a melhoria da gestão e do gerenciamento realizado até o momento no país.

Para Fratta e colaboradores (2019), mesmo após quase 10 anos da implantação desta política, os municípios possuem modestos resultados diante das metas estabelecidas, e muitos destes nem conseguem ao menos elaborar um Plano Municipal de Resíduos e, no pior dos casos, ainda possuem lixões/vazadouros a céu aberto (cerca de 18% dos municípios brasileiros).

Embasado nisso, o governo federal lançou o programa “Lixão Zero” no dia 30 de abril de 2019, o qual traz um plano de ações significativas que tratam de melhorias e promove incentivos ao aproveitamento energético dos RSUs (FRATTA et al., 2019).

Segundo Torres (2015), o poder público local é responsável pela gestão direta apenas dos resíduos domiciliares e dos provenientes da limpeza pública (varrição e capinagem de ruas, mercados públicos, feiras livres etc.), que pode ser feito por órgão da municipalidade ou ser terceirizado.

A limpeza pública realizada pelo município, em sua maioria, utiliza um sistema tradicional de coleta de resíduos sólidos residenciais em que há veículos que recolhem os resíduos em recipientes abertos ou fechados, sem triagem de seu conteúdo (Rodrigues; Santana, 2012).

De acordo com Tchobanoglous (1977) defende que as áreas gerenciais ligadas aos resíduos sólidos podem ser agrupadas em seis elementos funcionais, conforme a Figura 8.

Cunha e Caixeta Filho (2002), explica estes setores:

- 1) Geração Coleta: A organização do gerenciamento do processo de coleta deve estar preocupada em coletar a maior quantidade gerada possível.
- 2) Acondicionamento: A primeira etapa do processo de remoção dos resíduos sólidos corresponde à atividade de acondicionamento do lixo.
- 3) Coleta: A coleta normalmente pode ser classificada em dois tipos de sistemas: sistema especial de coleta (resíduos contaminados) e sistema de coleta de resíduos não contaminados.
- 4) Estação de transferência: O objetivo dessas estações

é reduzir o tempo gasto no transporte e, conseqüentemente, os custos com o deslocamento do caminhão coletor desde o ponto final do roteiro até o local de disposição final do lixo. 5) Processamento e recuperação: Um dos métodos de processamento dos resíduos sólidos urbanos é a incineração. Roth et al. (1999) 6) Disposição final: Em se tratando das alternativas de disposição final do lixo, Consoni et al. (2000) afirmam que o aterro sanitário é o que reúne as maiores vantagens, considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos sólidos urbanos

**Figura 8** - Áreas gerenciais ligadas a gestão de resíduos sólidos.



Fonte: Tchobanoglous (1977)

Em diversos estudos foi possível notar que a gestão dos resíduos no Brasil segue algumas vias básicas de descarte ou reaproveitamentos dos RSUs. É como observa-se no estudo de Fratta et al. (2019), onde a forma predominante de disposição final dos resíduos no Brasil é feita em aterros sanitários. A disposição dos resíduos em aterros acaba sendo realizada na maioria dos municípios já que, comparado com outras formas de tratamento dos resíduos, sejam os tratamentos térmicos, bioquímicos, mecânico, reciclagem ou compostagem, é a mais barata. De acordo com os dados da Abrelpe (2017), 58,1% dos resíduos coletados no Brasil são depositados em aterros sanitários.

Em muitos lugares dentre as técnicas de tratamento dos resíduos é comum no Brasil a reciclagem. Que não é propriamente dita uma forma de tratamento de resíduos, mas sim uma forma de reprocessamento da matéria. A reciclagem é um processo de transformação dos materiais que, além de reaproveitar os resíduos que seriam descartados, gera empregos, economiza as fontes de petróleo e contribui para a preservação da natureza (FRATTA et al., 2019).

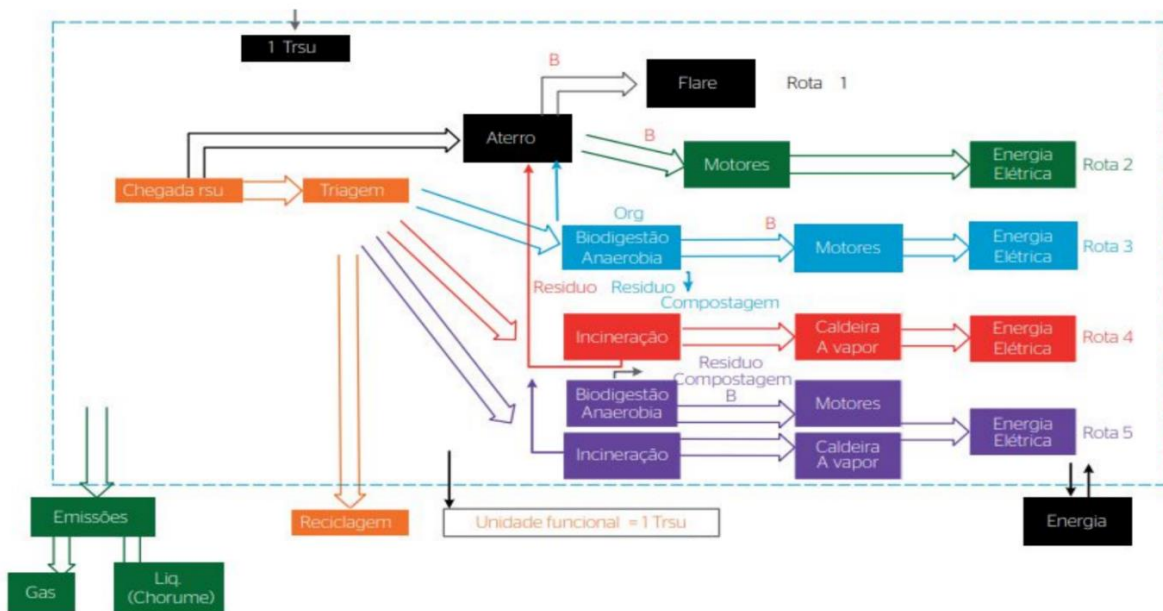
A gestão dos RSUs segue algumas rotas tecnológicas como por exemplo a coleta e uma separação dos materiais de acordo com suas características físicas, no caso de materiais secos e úmidos. Alguns estudos abordam a importância da separação adequada deste durante o processo de coleta, pois dependendo destas características cada tipo de lixo terá uma direção diferente, aonde os secos vão para a reciclagem e os úmidos diretamente para o processo de biodigestão anaeróbia (SOARES et al., 2017).

No trabalho de Soares e colaboradores (2017), eles abordam basicamente a rota comum que os RUSs devem seguir, este esquema pode ser visualizado na figura 9:

Caso os resíduos sigam diretamente para o aterro, este será aterrado e deve existir um flare para a queima dos gases gerados com a decomposição do material (Rota 1 apresentada na Figura 5), outra possibilidade é a geração de energia elétrica a partir de motores (Rota 2). Se os resíduos seguirem o caminho da triagem, os resíduos orgânicos podem seguir para o processo de biodigestão anaeróbia (Rota 3), onde gerarão um gás que será convertido em energia elétrica e um composto digerido que pode ser utilizado como biofertilizante. Seguindo a Rota 4, uma parte dos resíduos triados, que serão compostos por materiais que não são reciclados ou que não puderam ser aproveitados na reciclagem e parte de material orgânico que não foi separada, segue para o processo de incineração para posterior geração de energia elétrica. Esta etapa também pode ser substituída por outros tipos de tecnologias como a gaseificação ou pirólise. E por fim, a rota 5 que trata desde a chegada do RSU ao aterro até a geração de energia elétrica por intermédio de tratamento mecânico biológico e incineração.

**Figura 9** - Rotas tecnológicas disponíveis para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos

urbanos e a reciclagem de materiais.



Fonte: Soares et al., (2017)

## 7 PROJETO PPP RSU

Projeto de viabilidade para construção de usina de geração de energia a partir de RSU dos Municípios integrantes do Consórcio CIVAP, tratando e dando destinação aos resíduos sólidos urbanos, com objetivo de atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o aproveitamento energético, nos termos do Art.3º, inciso VII, da Lei Federal n 12.305/2010.

Este consórcio é composto por 37 Municípios, totalizando 633 mil habitantes, podendo ampliar o número de participantes, cujas adesões estão em processo de análise, sendo que a maior parte destes integrantes já possuem contrato de coleta, com finalidade de dar a devida destinação dos resíduos sólidos urbanos.

**Figura 10- Relação das cidades do consórcio**

CIV			CIV		
1	Ourinhos	113.542	20	Taciba	6.193
2	Assis	102.924	21	Campos Novos Paulista	4.900
3	Santa Cruz do Rio Pardo	47.148	22	Narandiba	4.746
4	Paraguaçu Paulista	45.255	23	Espirito Santo do Turvo	4.713
5	Agudos	37.214	24	Lupércio	4.584
6	Cândido Mota	31.263	25	João Ramalho	4.468
7	Rancharia	29.821	26	Ocauçu	4.308
8	Pirapozinho	27.021	27	Sandovalina	4.174
9	Palmital	22.196	28	Platina	3.488
10	Bastos	21.073	29	Pedrinhas Paulista	3.087
11	Tarumã	14.547	30	Nantes	3.049
12	Maracaí	13.981	31	Florínea	2.758
13	Quatá	13.893	32	Lutécia	2.705
14	Duartina	12.549	33	Oscar Bressane	2.616
15	Manduri	9.846	34	Cruzália	2.161
16	Iepê	8.103	35	Paulistânia	1.841
17	Ibirarema	7.540	36	Fernão	1.691
18	Gália	6.776	37	Borá	839
19	Echaporã	6.247	<b>TOTAL</b>		<b>633.260</b>

Fonte: Consorcio CIVAP

O modelo proposto é parceria Público-Privada, onde os municípios que aderirem devem delegar, através de contratos ao consórcio CIVAP, os serviços de tratamento e destinação final dos RSU, com aproveitamento energético, dos 37 municípios 16 aderiram formalmente ao estudo, com total de 328.656 habitantes, conforme tabela abaixo.

**Figura 11 - Cidades que aderiram a proposta**

**CIVAP - CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DO VALE  
DO PARANAPANEMA**

Nº	Municípios - Adesão à PPP	População
1	Assis	102.924
2	Santa Cruz do Rio Pardo	47.148
3	Paraguaçu Paulista	45.255
4	Cândido Mota	31.263
5	Rancharia	29.821
6	Palmital	22.196
7	Tarumã	14.547
8	Ibirarema	7.540
9	Echaporã	6.247
10	Campos Novos Paulista	4.900
11	Platina	3.488
12	Pedrinhas Paulista	3.087
13	Florínea	2.758

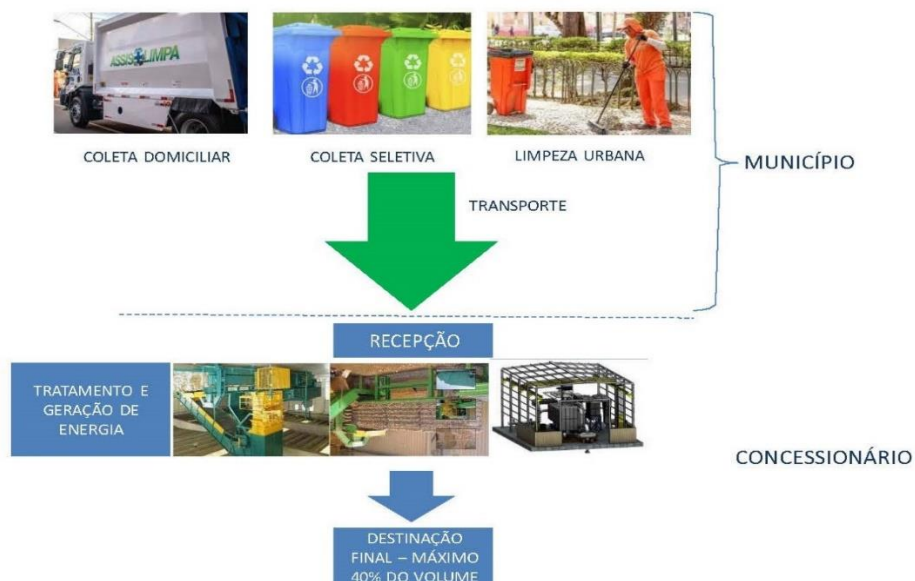
14	Lutécia	2.705
15	Oscar Bressane	2.616
16	Cruzália	2.161
<b>TOTAL</b>		<b>328.656</b>

Fonte: Consorcio CIVAP

Estes municípios já apresentam plano de saneamento, o maior problema enfrentado por eles é a questão de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos. O estudo tem por finalidade apresentar uma solução que agregue o maior número de municípios possíveis, sendo que isoladamente é praticamente inviável a instalação do projeto devido ao custo elevado.

Caberá aos municípios a manutenção dos serviços de limpeza urbana e coleta de resíduos domiciliares, que já estão sob sua responsabilidade, ficando pendente o local de destinação para transporte do mesmo a ser definido no projeto. A partir deste ponto a responsabilidade de recepção, tratamento, geração de energia e destinação dos resíduos resultantes do processo é de responsabilidade da concessionária.

**Figura 12-** Modelo proposto



Fonte: Consorcio CIVAP

A tecnologia a ser adotada no estudo é a de gaseificação e incineração, sendo está totalmente oposta à de aterros sanitários já que é uma solução que aproveita imediatamente os resíduos energeticamente, como forma de reduzir os volumes depositados nos aterros. A geração termoelétrica proveniente dos RSU, substituiu os combustíveis fósseis utilizados atualmente, atendendo a lei 12.305/10 que dispõe

sobre o destino final do “lixo”, com logística reversa e eliminação da contaminação do solo e lençol freático pelo chorume, resultante da decomposição dos compostos orgânicos presentes no RSU, transformando uma fonte de energia descartada em uma fonte de energia nobre, como a energia elétrica.

**Figura 13 - Planta Gaseificação WEG**



Fonte: WEG

O processo de gaseificação apresentou a maior rentabilidade e o menos impacto ambiental, tanto na emissão e os resíduos após o processo. É necessária uma preparação prévia dos RSU, que serão transformados em CDR (Combustível derivado dos resíduos) que possuem características próprias, este processo deve ser validado pela CETESB, quanto sua eficiência e qualidade nos aspectos ambientais.

De posse das informações a respeito das tecnologias apresentadas, das viabilidades econômicas e das vantagens mencionadas do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, o presente trabalho considera a implantação de uma unidade de tratamento de 300 toneladas dia de resíduos classe II-A, que consistirá na recepção, processamento, trituração, separação magnética de metais, prensagem, abatimento de umidade, enfardamento e acondicionamento para destinação térmica por meio de gaseificação em leito fluidizado circulante com posterior geração de energia elétrica utilizando caldeira e turbina a vapor.



Os resíduos que chegarem à usina serão controlados quanto à origem, quantidade e natureza, por meio de um sistema de rastreabilidade. A pesagem em balança permitirá também, através da diferença de peso bruto obtido na chegada e a tara obtida na saída do veículo, determinar a quantidade, em massa, de resíduo consumido na usina objetivando o controle de rendimento global da planta.

O CDR, após transitar pelas válvulas alimentadoras, é alimentado no reator por meio de uma rosca sem fim. A dosagem de CDR no reator é realizada por “software”, que compilam as leituras dos instrumentos online (termopares, transdutores de pressão e medidores de vazão) instalados ao longo do reator, que resulta em movimento rotativo da esteira extratora do silo de alimentação, aumentando ou diminuindo a quantidade mássica de produto a ser inserido no reator.

**Figura 14** - Geração de vapor (Caldeiras)



Fonte: WEG

Dentro do reator, o CDR em contato com o leito fluidizado circulante, composto de sílica a 850°C juntamente com o ar de processo proveniente dos sopradores, transforma-se em um gás combustível através de reações químicas.

Considera-se que a operação se dará em alta temperatura para inertizar os patógenos e eliminar gases provenientes do processo de aquecimento, tornando os resultados compatíveis e sempre muito menores que as normas vigentes em nosso estado.

Esse sistema de tratamento de RSU é uma forte vertente apresentada neste trabalho com finalidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, na qual o produto final será um gás combustível para aproveitamento energético por meio de moto-geradores ou ciclo Rankine a vapor.

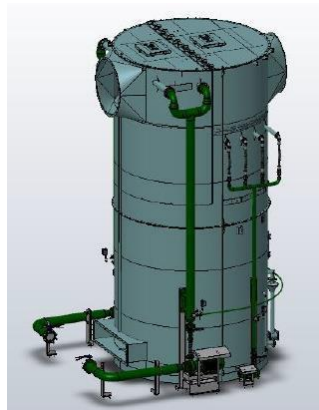
A mesma está dividida em três blocos distintos, porém, integrados e dependentes entre si, sendo eles;

1 - Unidade de recepção e produção de CDR – Combustível Derivado de Resíduos de origem industrial ou urbana: Trata-se de unidade composta por equipamentos que atuam no material recebido promovendo sua trituração, desumidificação e seleção mecânica, com ou sem auxílio de pessoas, produzindo um combustível homogêneo e específico para o reator. Esse processo se retroalimenta da própria energia gerada pelo sistema.

2 - Unidade de gaseificação: Trata-se do setor destinado a converter a energia potencialmente contida no CDR, em gás combustível de múltiplas aplicações. Nesta unidade a massa de vapor partir dos gases de combustão do syngás dos materiais chegam em 420 °C, a uma pressão de 40 kgf/cm<sup>2</sup>(g).

Lavador de Gases: O sistema de bombeamento para os bicos ejetores e pulverizadores operam em circuito fechado. O lavador de gases opera de forma contínua e o efluente gerado é destinado para estação de tratamento.

**Figura 15** - Gaseificador



Fonte: WEG

3 - Unidade de geração de energia elétrica: Como uma das aplicações possíveis para o gás produzido no processo, a geração de energia elétrica é a que possibilita o melhor aproveitamento energético e financeiro do mesmo.

Atende dois modelos diferentes de geração: ciclo Otto e o ciclo Rankine; ou seja, o gás gerado poderá ser utilizado como combustível diretamente em moto-

geradores, de ciclo Otto, onde a explosão interna aciona geradores acoplados. Ou, em diretamente em combustores do tipo caldeiras aquatubular e turbo-geradores, acionados pelo vapor gerado pelo processo.

A melhor eficiência no aproveitamento energético está no ciclo Otto com 35%, mas sua viabilidade econômica é limitada a 2 MW. Para a geração de potências superiores a 2 MW, a utilização do ciclo Rankine com rendimento de 30%, torna-se a opção mais viável economicamente para a geração elétrica na utilização de gaseificadores, devido ao ganho de escala e conseqüentemente ao menor investimento R\$/MW instalado.

**Figura 16** - Geração de energia Elétrica (WEG / TGM)



Fonte: WEG

## 8 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado ao aumento do consumo energético e, conseqüentemente, ao crescimento da geração de lixo urbano por habitante. O lixo se torna problema quando a capacidade de tratamento adequado é ultrapassada, ou seja, produzir lixo além da capacidade de tratamento se torna condição insustentável.

O presente trabalho tinha o objetivo de elaborar uma revisão da literatura sobre as tecnologias de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos (RSUs). Desta forma, sugerir diretrizes que possam ser aplicadas no Brasil.

É notável que a produção de energia através dos RSUs já é uma realidade bastante usual em diversos países de todo o mundo, mas não no Brasil. Para que esta realidade seja aplicada, precisa-se tomar atitudes iniciais. O adequado seria tentar mudar primeiramente esse cenário atual da gestão dos resíduos no país, dando um destino final correto para os RSUs. Um resíduo tem bastante o que se aproveitar antes de ser descartado. O processo de descarte dos RSUs se da seguinte forma: primeiro necessita reutilizar; se não for possível, reciclar; logo após, tratar, e por último disposição final (aterros sanitários).

É interessante ressaltar as tecnologias que podem ser aplicadas para que o processo de geração de energia a partir dos RSUs seja possível. O principal método e mais comum de ser utilizado é a incineração; outra tecnologia aplicada, é a tecnologia química, a digestão anaeróbica, essa tecnologia é interessante pois nela podemos aproveitar os aterros já existentes, e coletar o metano e realizar o processo de conversão de energia mecânica em elétrica.

A implantação das tecnologias para a produção de energia elétrica a partir dos RSUs seria uma solução para acabar com os lixões, porém por falta de incentivo político, essas implantações acabam sendo caras e não possuem um rendimento econômico, e isso acaba não atraindo as indústrias privadas. Outro obstáculo é na questão ambiental, no que diz respeito do licenciamento, pois os procedimentos que estão ligados aos RSUs não são bem aceitos. Para criar um novo aterro, é necessário uma seleção de áreas adequadas para a instalação e que estão cada vez

mais difíceis, legalmente.

Uma das principais conclusões deste trabalho, é que o Brasil tem sim potencial para gerar energia a partir dos RSUs, mas não tem infraestrutura economicamente para pôr em prática. Existem ainda bastante gargalos e barreiras que o Brasil precisa ultrapassar para se tornar um país que aproveite o lixo para gerar energia. Algumas soluções para esses problemas seriam: simplificar o sistema de licenciamento ambiental, incentivos fiscais, uma melhor gestão ambiental e incentivos econômicos (linhas de créditos em bancos).

Por fim vale ressaltar que a recuperação energética dos RSUs já é uma realidade concreta em vários cantos do mundo, e no Brasil já se mostra tentando aplicar essas tecnologias no País. E em destaque, tem-se que estar expressamente prevista nas disposições da PNRS como uma das alternativas de destinação ambientalmente adequada de resíduos, a recuperação energética pode trazer alguns resultados adicionais quando colocada em prática.

O tratamento dos RSUs não é uma opção, e sim uma necessidade. Usar os RSUs para geração de energia é uma solução tanto econômica, como ambiental, e social. Pois desta forma poderia erradicar a opção dos lixões serem o destino dos resíduos. Passaria a aproveitar esses resíduos que estariam prejudicando ao meio ambiente, e recupera-los como fonte de energia elétrica, ajudando a complementar a matriz energética.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) (2015) Matriz de energia elétrica, Banco de Informações de Geração (BIG). Brasília: **ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 10 out. 2021.

ANDRADE, L. et al. A utilização das redes sociais digitais no cuidado psicossocial infantojuvenil, diante da pandemia por Covid-19. **Health Residencies Journal**, v. 1, n. 2, p. 44-61, 2020.

AGÊNCIA REGULADORA DE ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (AGENERSA). (2012) Lei nº 6.361, de 19 de dezembro de 2012. Dispõe sobre a Política Estadual de Gás Natural Renovável GNR. Rio de Janeiro: **AGENERSA**. Disponível em: <<https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/1033645/lei-6361-12>>. Acesso em: 10 out. 2021.

ANGELIDAKI, I.; BATSTONE, D. J. Anaerobic Digestion: Process. In: **Solid Waste Technology & Management**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. p. 583–600.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: **Ministério de Minas e Energia**, 2001. 45 p.

AMPONSAH, N.; TROLDBORG, M.; KINGTON, B.; AALDERS, I.; HOUGH, R. L. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of life cycle considerations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 461-475, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>

ASLANZADEH, S.; RAJENDRAN, K.; TAHERZADEH, M.J. A comparative study between single-and two-stage anaerobic digestion processes: Effects of organic loading rate and hydraulic retention time, Int. **Biodeterior. Biodegrad.** 181– 188. [13] R. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS (ABRELPE) (2015) Panorama de Resíduos Sólidos, Brasil. São Paulo: **ABRELPE**. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2012. São Paulo, SP: **ABRELPE**, 2013. 120 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ALVES, A.M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 105p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

BALTAZAR, S. M. **Justiça ecológica: proteção do meio ambiente e a jurisprudência das cortes superiores brasileiras**. Curitiba: **Juruá**, 2019

BARBOSA, R. M. **Política nacional de resíduos sólidos**. São Paulo: **Martins Barbosa**, 2019.

BARIN, A. (2012) **Seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem com a lógica difusa**. Tese (Doutorado em Energia Elétrica) – **Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria**. Disponível em: < [http://cascavel.ufsm.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=4583](http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4583)>. Acesso em: 10 out. 2021.

BNDES. (2018). **A energia solar no Brasil**. Disponível em < <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/energia-solar>>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRASIL. (2002) **Lei Federal nº 10.438**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), e dá outras providências. Brasília. Disponível em: < [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.2010. Disponível em: < [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: **Centro Gráfico**, 1988.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Secretaria de recursos hídricos e ambiente urbano**. Levantamentos e análises da situação dos planos de resíduos sólidos no estado do Espírito Santo: relatório técnico único. Brasília, 2012.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia (MME)**. A energia eólica no Brasil e no mundo, 2016b. Disponível em < [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2)>. Acesso em: 10 out. 2021.

BRANCO, S. M. **Ecosistêmica: uma abordagem integrada dos problemas do meio ambiente**. 2.ed. São Paulo: **Edgar Blücher**, 2014.

BRINGHENTI, JR. **Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos: Aspectos Operacionais e da Participação da População**. São Paulo, 2004 [Tese de Doutorado

– Faculdade de Saúde Pública da USP].

BURSZTYN, M. (2020). Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. **Estudos Avançados**, 34(98), 167-186. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.011>

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, 5. 2. ed. Belo Horizonte - MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2007.

COSTA, A. O.; OLIVEIRA, L. B.; LINS, M. P. E.; SILVA, A. C. M.; ARAÚJO, M. S. M.; PEREIRA JÚNIOR, A. O. et al. Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 407–412, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.005>

CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: **CEMPRE**, 2010.

COLAFERRO, L (2021). **Energia Solar no Brasil: um Panorama para [Você] Entender Tudo**. Disponível em <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-no-brasil-panorama/>>. Acesso em: 10 out. 2021.

COSTA, I. P. P.; ABREU, Y. V. Estudo sobre a possibilidade de geração de energia a partir de resíduos de saneamento. **Desafios**, v. 5, n. 1, p. 14-25, 2018.

DE BAERE, L. Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future? **Water Science and Technology**, v. 53, n. 8, p. 187-194, 2006.

DUTRA, R. Energia eólica: princípios e tecnologia. Rio de Janeiro: **CRESESB**, 2008. 58p.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), 2017. **History of wind power**. Disponível em: < [http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=wind\\_history](http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=wind_history) >. Acesso em: 10 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2015) Balanço Energético Nacional 2015, Ano Base 2014. Brasília: **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2015>>. Acesso em: 10 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inventário energético dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro, 2007.

FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente. Relatório 3: estudo prospectivo das alternativas governamentais, nacionais e internacionais, voltadas ao financiamento de plantas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos / Engebio; **Fundação Estadual do Meio Ambiente**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio



Ambiente, 2009. 20p.

FEAM. Termo de referência para apresentação de Relatório de Controle Ambiental (RCA). Sistema de biometanização de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. **TRRCA Biometanização Versão 1.0** – 30/08/2010.

FEAM. Termo de referência para apresentação de Relatório de Controle Ambiental (RCA). Sistema de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. **TRRCA Tratamento Térmico Versão 2.0** – 01/11/2011.

FEAM. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.; il. **FEAM-DPED-GEMUC**.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (FEAM). (2009) Análise de pré-viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de um sistema de aproveitamento energético de biogás em um aterro sanitário existente no estado de Minas Gerais. **Relatório 1. Belo Horizonte: FEAM**. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/fean/parte1.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2021.

FURTADO, J.G.M; SERRA, E.T. Avaliação tecnológica sobre a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. **XX SNPTEE- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Recife-PE: 22 a 25 Novembro de 2009.

FRATTA, K. D.S. A.; TONELI, J. T. de C. L.; MARANA, K. B. B.; ANTONIO, G. C. Revisão sistemática da situação da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil, visando o seu aproveitamento energético. **IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Fortaleza/CE – 04 a 07/11/2019

GALIZA, J. de J. M. de.; CAMPOS, A. F. Regulação de resíduos sólidos urbanos para geração de energia a partir do biogás: estudo de viabilidades em regiões da grande Vitória/ES. **Rev. Augustus** | Rio de Janeiro | v. 20 | n. 40 | p. 56-69 jul./dez. 2015. Doi <http://dx.doi.org/10.15202/19811896.2015v20n40p56>

GODOY, M. B. R. B. Dificuldades para aplicar a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 23, n. 39, 2013.

GOMES, P. C. Gestão integrada de resíduos sólidos: uma aplicação prática. São Paulo: **Appris**, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010). Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: **IBGE**.

\_\_\_\_\_. (2011) Sinopse do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: **IBGE**.

IBRAHIN, F. I. D. **Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: **Érica**, 2014.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2014) Climate

Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Genebra: IPCC**. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 10 out. 2021.

IPEA. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Disponível em < <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em: 10 out. 2021.

JESUS, W. F. Caracterização das Formas de Destinação Final Impostas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e Identificação de seus Principais Aspectos e Potenciais Impactos. 29f. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Ambiental. **UTFPr. Londrina**, 2013.

JINGURA, R. M.; MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009

JUNIOR, R. T.; SAIANI, C. S.; DOURADO, J. Resíduos sólidos no Brasil: oportunidades e desafios da lei federal nº 12.305. Rio de Janeiro: **Manole**, 2014.

LIMA, F. M. de A (2017). **Panorama da geração de energia elétrica a partir de resíduo sólido urbano**. Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina, Campina Grande.

LOPEZ, R.A. **Energia eólica**. São Paulo: Artliber, 2002. 156p.

LUNA, N. A. **Avaliação de empresas utilizando a teoria das opções reais: o caso de uma geradora de energia eólica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/30855>.

MAGALHÃES, M.V. **Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no Brasil**. 50p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MARCHI, C. M. D. Gestão dos resíduos sólidos: conceitos e perspectivas de atuação. São Paulo: **Appris**, 2019.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1-13, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>

MARTINS, L. O. S.; SILVA, T.; CARNEIRO, R. A. F. Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus - BA. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 2, n. 2, p. 142-166, 2016.

MOURA, P. A. P. Responsabilidade civil por danos ambientais na indústria do petróleo.

Rio de Janeiro: **E-papers**, 2007.

MUYLAERT, M.S. (2000) Consumo de energia e aquecimento do planeta. Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo MDL do Protocolo de Quioto - Estudos de Caso. Rio de Janeiro: **Editora da Coppe**.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F de A. S.; GIANANTE, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Eng Sanit Ambient** | v.42 n.1 | jan/fev 2019 | 143-155 DOI: 10.1590/S1413-41522019171125

OLIVEIRA, L. B.; HENRIQUES, R. M.; PEREIRA JUNIOR., A. O. Use of wastes as option for the mitigation of CO2 emissions in the brazilian power sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, n. 14, p. 3247-3251, 2010.

PARK, Y., HONG, F., CHEON, J., HIDAKA, T.; TSUNO, H. Comparison of thermophilic anaerobic digestion characteristics between single-phase and two-phase systems for kitchen garbage treatment. **Journal of bioscience and bioengineering**, 2008, 105(1), 48-54

PAVAN, M.C.O. **Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil, 2010**, 186 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PECORA, V.G.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; COELHO, S.T. (2010) Aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica em São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 7., São Paulo. **Anais... São Paulo: USP**, p. 1249-1261.

PEREIRA, E. V. Resíduos sólidos. São Paulo: **SENAC**, 2019

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: **INPE**, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089> 80p.: il. (EBOOK)

PETRONOTÍCIAS. (2014) Gás extraído de aterro sanitário passa a ser consumido pela Reduc. **PetroNotícias**, Rio de Janeiro. Disponível em:< <http://www.petronoticias.com.br/archives/52304>>. Acesso em: 10 out. 2021.

RAMPINELLI, G. A.; ROSA JÚNIOR, C. G. Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 14, n. 2, p. 273-302, 2012.

RAPOSO, F. et al. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode : An overview relating to methane yields and experimental procedures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 861–877, 2011.

REICHERT, G.A. (2014) Painel 4 – Tecnologias apropriadas para o tratamento dos

resíduos sólidos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, DESAFIOS PARA IMPLANTAÇÃO DA POLÍTICA NACIONAL, 11., **ABES**. Brasília: Disponível em: < [http://www.abes-df.org.br/upload/estudo/2014\\_08\\_19/41-gerald-reichert-tecnologias.pdf](http://www.abes-df.org.br/upload/estudo/2014_08_19/41-gerald-reichert-tecnologias.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2021.

RIO DE JANEIRO. (2014) Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: **Secretaria de Estado do Meio Ambiente**. v. 2, tomo I. Disponível em: < <http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeconteudo?article-id=1941406>>. Acesso em: 10 out. 2021.

RIGHTER, R. W. Wind energy in America – a history. Oklahoma, EUA: **University of Oklahoma Press**, 1996.

REN21 - **Renewables** 2016 - Global Status Report. Disponível em < <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR2016FullReportlowres.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2021.

ROCHA, S. M.; LUSTOSA, K. B.; ROCHA, R. R. C. Política brasileira de resíduos sólidos: reflexões sobre a geração de resíduos e sua gestão no município de Palmas-TO. **Revista ESMAT** 13, 2017

RODRIGUES, W.; SANTANA, W. C. (2012). Análise econômica de sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos: o caso da coleta de lixo seletiva em Palmas, TO. **Revista de Gestão Urbana**. 4(2), 299-312.

SCARLAT, N., DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, Parte A, p. 457-472, 2018.

SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JÚNIOR, A. O. An optimal mix of Schmidt PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. **Renewable Energy**, v. 85, p. 137-147, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.010>

SILVA, C. S. F. et al. Diagnóstico socioambiental do bairro Montese, situado na bacia de drenagem Tucunduba, Belém-Pa. In: **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais**. 2018.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 993-1003, 2017. Disponível em < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522017000500993&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000500993&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 10 out. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152201715552>

SOUSA, R. S. M; GAIA, D.S; RANGEL, L.S. Geração de energia através do lixo. **Revista Bolsista de Valor**. v. 1 (2010). Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/1849/1027>>. Acesso em: 10 out. 2021.

SOUSA, R. S. M; GAIA, D. S.; RANGEL, L. S. Geração de energia através do lixo. **Revista de divulgação do projeto Universidade Petrobrás e IF Fluminense**, v. 1, p. 377-381, 2010.

SONNTAG, R. E.; BOGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 6ª ed. **Americana: Ed. Edgard Blücher**, 2003, 730 p. ISBN: 978- 8521207924.

STUCHI, G.A.D.; TACONELLI, M.; LANCHI, V.A.B. Geração Termelétrica: Principais componentes e tipos de centrais termelétricas. São Carlos: **Universidade de São Paulo**, 2015.

TCHOBANOGLIOUS, G. Solid wastes: engineering principles and management. Issues. Tokyo: **McGraw-Hill**, 1977. 15.

TORRES, C. N. A gestão dos resíduos sólidos no município de Cascavel, Ceará: fragilidade ambiental, social e política. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 6, n. 3, p. 84 - 97, jul. 2015. ISSN 2178-0463. Disponível em <<http://www.geosaberes.ufc.br/geosaberes/article/view/459>>. Acesso em: 10 out. 2021.

TORRES, L; BAJAY, S. Análise das políticas no aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. Universidade de São Paulo – USP – São Paulo: 11 a 13 de novembro de 2015.

ZAGO, V. C.; BARROS, R. T. de V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Eng. Sanit. Ambient.** v.24, n.2, Mar/Apr 2019.

YU, S.; JINJE PARK, J.; CHANGKOOK, R. Improvement of energy density and grindability for wood pellets by torrefaction. **The 3rd International Conference on Bioresource, Energy, Environment, and Materials Technology**. BEEM: 12-15, Hongkong, China, June, 2019.