

Universidade de São Paulo
Programa de Educação Continuada PECE – Escola Politécnica

Anderson de Oliveira Silva

Análise do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos no Vale do Ribeira

São Paulo

2021

Anderson de Oliveira Silva

Análise do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos no Vale do Ribeira

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica para conclusão do curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientadora: Professora Vanessa P.Garcilasso

São Paulo

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Anderson de Oliveira

Análise do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos no Vale do Ribeira / A. de O. Silva.
–São Paulo, 2021.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE.

1. Energias Renováveis 2. Geração por uso da Biomassa, analise do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no vale do Ribeira. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE

RESUMO

Essa monografia apresenta um breve estudo de caso, em que é analisado o Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos no Vale do Ribeira, para que esse estudo fosse realizado, foi levantado todos RSU gerado nessa região, que é uma região de grande extensão territorial, porem juntando todas as cidades, sua população é menor que 500.000 habitantes, hoje as cidades que compõem o Vale do Ribeira geram em torno de 94.000 t/ano de RSU, a grande maioria dispõem os RSU em outras localidades, pois das vinte e cinco cidades estudadas, quatro ainda dispõem os RSU em locais inapropriados, o que pode causar um grande impacto ambiental. Nesse estudo de caso, foram analisados as diversas tecnologias que temos para o tratamento de RSU disponível no Brasil, sendo assim realizado as melhores ou mais eficiente maneira de aproveitar os RSU para a geração de biogás, biometano e energia elétrica.

Palavras Chave: Biogas, Residuos Solidos Urbanos, Energia Eletrica, biometano

ABSTRACT

This monograph presents a brief case study, in which the Energy Potential of Urban Solid Waste in Vale do Ribeira is analyzed. For this study to be carried out, all MSW generated in this region, which is a region of large territorial extension, was surveyed. bringing all the cities together, its population is less than 500,000, today as the cities that make up the Ribeira Valley generate around 94,000 t/year of MSW, the vast majority use MSW in other locations, because of the twenty-five cities studied , four still discharged from MSW in inappropriate places, which can cause a great environmental impact. In this case study, the various technologies that we have for the treatment of MSW available in Brazil were trained, thus being carried out the best or most efficient way to use MSW for the generation of biogas, biomethane and electricity.

Keywords: Biogas, Solid Urban Waste, Electric Energy, Biomethane

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
2. PANORAMA DOS RSU	12
2.1 RSU NO BRASIL	12
2.1.1 RSU NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	14
2.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)	15
3. SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE RSU	18
3.1 DISPOSIÇÃO DE RSU.....	18
3.2 TRATAMENTO DE RSU	21
3.2.1 TRATAMENTO BIOLÓGICO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RSU	21
3.2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DOS RSU	23
3.2.2.1 INCINERAÇÃO	23
3.2.2.2 GASEIFICAÇÃO	25
4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU NO BRASIL	26
4.1 BIOGÁS NO BRASIL E SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	26
4.2 BIOGÁS EM SÃO PAULO E SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	27
4.3 Cases de Aproveitamento Energético dos RSU.....	27
4.3.1 Termoverde Caeiras e Salvador	27
4.3.2 Aterro de Gramacho e de Seropédica	28
4.3.3 Aterro GNR Fortaleza	29
5.2.2 Biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSU	38
5.2.3 Tratamento térmico dos RSU (WtE)	40
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
5.4 ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS.....	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Dados da geração e coleta de RSU no ano de 2019.....	12
Figura 2 Comparativo do descarte adequado x inadequado do RSU em 2019.	13
Figura 3 Comparaçao dos últimos 10 anos da disposição final de RSU por tipo de destinação (%)	13
Figura 4 Fluxograma da produção de resíduos.....	15
Figura 5 Aumento da disposição de resíduos na ultima década.....	19
Figura 6 Aterro Sanitário	19
Figura 7 Aterro Controlado	20
Figura 8 Lixão a céu aberto	20
Figura 9 Incinaração.....	24
Figura 10 processo de gaseificação	25
Figura 11 Planta Termoverde Caieiras	28
Figura 12 Aterro Gramacho Fonte:	29
Figura 13 Usina de GNR Fortaleza.....	30
Figura 14 Usina de Furnas X Carbogas	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Atividades x ano Cetesb	15
Tabela 5.1 Destinação Adequada de 21 cidades e volume anual	33
Tabela 5.2 com destinação inadequada e volume anual	33
Tabela 5.3. Composição gravimétrica média dos RSU.	34
Tabela 5.4. Potenciais disponíveis a partir da disposição de RSU em aterro sanitário para os municípios que compõem o Vale do Ribeira	37
Tabela 5.5. Potenciais disponíveis a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU para os municípios que compõem o Vale do Ribeira.....	39
Tabela 5.6: Potencial para geração de energia elétrica por tipo de tecnologia	41
Tabela 5.7. Potenciais disponíveis a partir da gaseificação dos resíduos após processo de triagem para os municípios que compõem o Vale do Ribeira	43
Tabela 5.8. Potencial de biogás, biometano e energia disponível por meio da disposição de RSU em aterro sanitário.....	44
Tabela 5.9. Potencial de energia elétrica disponível a partir da disposição de RSU em aterro sanitário e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município	45
Tabela 5.11: Potencial de energia elétrica disponível a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município	47
Tabela 5.12. Potencial de energia elétrica através tecnologia de gaseificação	48
Tabela 5.13 Potencial de energia elétrica disponível a partir da gaseificação de resíduos e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município	49
Tabela 5.14. Potencial de energia elétrica através tecnologia de gaseificação e fração orgânica dos RSU.....	50
Tabela 5.15 Potencial de energia elétrica disponível a partir da solução híbrida e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município	51

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grande privilégio, pois sua matriz elétrica tem um potencial enorme de geração de energia e de fontes renováveis, que hoje representa 83% de sua produção, enquanto no restante do mundo esse valor é de 25%. (BEN, 2020)

O sistema energético mundial sempre foi muito dependente de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, e, com o aumento do consumo de energia ano a ano, cada vez mais suas reservas são exploradas de forma exaustiva, trazendo efeitos bastante negativos ao meio ambiente, entre eles o impacto nas mudanças climáticas em todo o planeta e esgotamento de recursos naturais não renováveis.

Dentro deste contexto, a bioenergia é um dos fatores que nos traz grandes vantagens ambientais, fazendo-nos analisar melhor as energias renováveis e estudarmos os fatores que nos beneficiam, e assim aplicá-las na nossa matriz elétrica. Além disso, a bioenergia traz um leque de oportunidades, dentre eles a criação de empregos e produção local.

A bioenergia correspondente à energia da biomassa, incluindo matéria de origem vegetal; resíduos urbanos (sólidos e esgoto sanitário), rurais (agrícolas e de pecuárias) e agroindustriais; óleo vegetais, além de combustíveis produzidos por meio de culturas agrícolas.

Com o aproveitamento energético da biomassa, a matriz energética brasileira, pode chegar a números ainda mais expressivos na geração de energia limpa, pois o Brasil possui um grande potencial de geração de energia a partir de fontes renováveis.

Dante do exposto, este trabalho tem como objetivo a análise do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Vale do Ribeira, região do estado de São Paulo, que será objeto de estudo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta monografia é analisar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no Vale do Ribeira. O Vale do Ribeira é uma região cercada por mata atlântica e engloba os municípios de Apiaí, Barra do Chapéu, Barra do Turvo, Cajati, Cananeia, Eldorado, Iguape, Ilha Cumprida, Iporanga, Itaóca, Itapirapuã Paulista, Itariri, Jacupiranga, Juquiá, Jiquitiba, Miracatu, Parque-Açu, Pedro de Toledo, Peruibe, Registro, Ribeira, Ribeirão Branco, São Lourenço da Serra, Sete Barras e Tapiraí.

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, os seguintes ferramentas específicas serão elaboradas:

- (i) Levantamento do potencial de geração de biogás, biometano e energia elétrica a partir dos RSU da região sendo destinados a aterro sanitário;
- (ii) Levantamento do potencial de geração de biogás, biometano e energia elétrica a partir do tratamento biológico da fração orgânica presente nos RSU da região;
- (iii) Levantamento do potencial de geração de energia elétrica a partir dos RSU em sistemas “Waste to Energy” (gaseificação e incineração), no contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS);
- (iv) Análise dos principais aspectos ambientais envolvidos no tratamento/destinação dos RSU, com foco na região do estudo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ano a ano o planeta requer mais energia para atender a sua demanda. Além do alto custo na energia, o crescimento médio do consumo total de eletricidade entre 2019 e 2030 é de 3,1% a.a., conforme apontado pela Empresa de Pesquisas Energéticas EPE. (PDE 2030)

Estes fatores nos indicam a necessidade de buscar oportunidades de uma geração de energia mais barata e igualmente mais sustentável.

Uma das maneiras de colaborar com a crescente demanda energética do país, é a geração de energia a partir de fontes renováveis, como é o caso do biogás proveniente dos RSU, objeto de estudo deste trabalho.

No Brasil a geração de energia elétrica proveniente de aterros sanitários é uma realidade. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL,2020), há 21 plantas de geração e aproveitamento energético de biogás proveniente de RSU instaladas no Brasil que, juntas somam 171,59 MW de potência outorgada.

O biogás pode ser utilizado na produção de energia elétrica e de energia térmica, além de poder ser transformado em biometano para utilização nas redes de gás natural e uso veicular. Conforme demonstrado por Coelho et. al. (2020), por meio do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, somente no estado o potencial de biometano disponível poderia substituir pouco mais de 72% do diesel comercializado. Quanto ao biogás disponível, caso seja utilizado para a geração de energia elétrica, o potencial de 36.197 GWh/ano poderia atender 93% do consumo residencial no estado, o que demonstra a importância e o potencial de substituição dos combustíveis fósseis pelo biogás/biometano.

Diante do exposto e do grande potencial disponível do estado de São Paulo, este trabalho propõe desenvolver uma análise do potencial energético dos RSU no Vale do Ribeira/SP, considerando os cenários de disposição e tratamento adequado dos RSU da região. Por ser uma região cercada por mata atlântica, pretende-se ainda realizar análise dos principais aspectos ambientais envolvidos no aproveitamento energético dos RSU.

Os resultados obtidos neste projeto poderão fornecer subsídios para novas pesquisas sobre o tema, de forma a ampliar com racionalidade e eficiência o uso energético dos RSU no Brasil.

2. PANORAMA DOS RSU

Este capítulo apresenta o panorama dos RSU, ou seja, dados sobre a geração, coleta e destinação dos RSU no Brasil e no estado de São Paulo. São abordadas também as principais questões da Política Nacional dos Resíduos Sólidos Urbanos (PNRS).

2.1 RSU NO BRASIL

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), os resíduos podem apresentar estado sólido ou semi sólido, tendo origem desde industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e até de varrição, e recebem a classificação de Resíduos Não Perigosos, segundo a classificação estabelecida no Artigo 13 da PNRS. Essa definição também engloba os resíduos gerados por sistema de tratamento de água e esgoto, controle de poluição, ou líquidos que possuem descarte inviável nos sistemas de água (ABNT, 2004).

Conforme a Abrelpe (2020), em 2019 o Brasil gerou 79 milhões de toneladas de RSUs. Desse total, quase 73 milhões de toneladas foram coletadas, e cerca de 6,3 milhões de toneladas foram descartadas inadequadamente, o que impacta e acarreta em inúmeros danos ambientais a curto, médio e longo prazo (ABRELPE, 2020). A Figura .1 apresenta um comparativo entre a geração de resíduos (t/ano) e o montante coletado no ano de 2019.

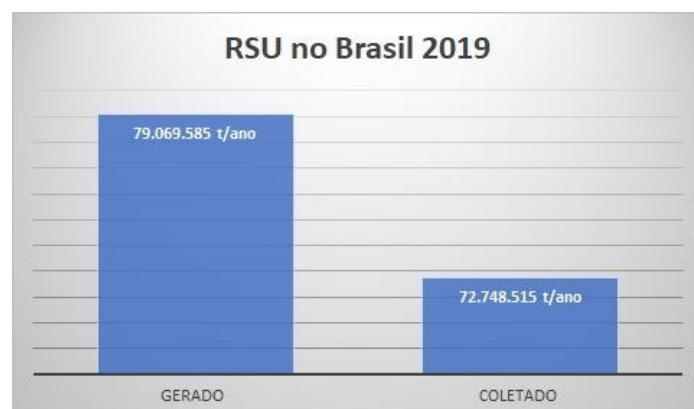


Figura 1 Dados da geração e coleta de RSU no ano de 2019

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020)

Do montante coletado, somente 59,5% dos resíduos chegaram ao destino final de forma adequada, correspondente à 43,3 milhões de toneladas. O restante, 40,5% dos RSU (29,5 milhões de toneladas), foram despejados em locais impróprios com lixões ou aterros que não contam com medidas seguras de descarte, expondo e pondo em risco pessoas, animais, rios, solo e lençóis freáticos (ABRELPE, 2020). A Figura 2 apresenta os dados de disposição adequada e inadequada de RSU no Brasil (t/ano).



Figura 2 Comparativo do descarte adequado x inadequado do RSU em 2019.

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020)

De 2010 para 2019 a destinação dos RSU para aterros sanitários subiu de 56,8% para 59,5%, enquanto que para o mesmo período a quantidade de RSU destinado aos lixões recuou de 19,3% para 17,5%. A Figura 3 apresenta o percentual comparativo da destinação dos RSU nos últimos 10 anos.



Figura 3 Comparaçao dos últimos 10 anos da disposição final de RSU por tipo de destinação (%)

Fonte: Adaptado de Abralpe (2020)

2.1.1 RSU NO ESTADO DE SÃO PAULO

Em São Paulo, centro da economia do país e também maior produtora de resíduos do Brasil, em 2019 foram gerados 23 milhões de toneladas de RSU, e foram coletados 99,6% desse total. Com isso, São Paulo torna-se hoje o Estado com o maior índice de coleta do Brasil, seguido pelo estado do Rio de Janeiro que apresenta um índice de coleta de 99,5% dos RSUs gerados (ABRELPE, 2020).

Na última década, em São Paulo, houve um crescimento de geração de RSU de 18 milhões para 23 milhões de toneladas, isso representa um crescimento de aproximadamente 23%. Entretanto no mesmo período o índice de coleta obteve um crescimento de 95,9% em 2010 para 99,6% em 2019 (ABRELPE, 2020). Isso mostra um aumento significativo no índice de coleta na ultima década.

Para o controle da poluição e degradação ambiental, a Cetesb, criada há 53 anos, realiza e disponibiliza desde 1997 o Inventário Estadual de Resíduos Domiciliares, que contém informações sobre as condições dos locais de disposição final dos RSU no estado de São Paulo (CETESB, 2020). O Inventário apresenta ainda os resultados do Índice de Qualidade de Aterro de Resíduo (IQR), metodologia utilizada para determinar a pontuação e a classificação desses locais de disposição.

Conforme o relatório da Cetesb (2020), dos 645 municípios do Estado de São Paulo, somente 610 dispuseram os RSU de forma adequada em 2019. Porém, em 2020 esse número sofreu uma redução para 585 municípios (redução de 4,1%). Essa redução deve-se ao fato de que alguns locais de disposição de RSU classificados como inadequados (aterros controlados e lixões), cuja vida útil já havia se esgotado e/ou foram interditados pela Cestesb, continuaram operando de forma irregular, descumprindo a interdição.

As agências ambientais da Cetesb vêm fiscalizando os aterros por meio de inspeções, advertências, multas e interdições. A Tabela 1. apresenta os dados de atividades executadas pela Cetesb nos últimos anos.

Tabela 2.1- Atividades x ano Cetesb

Atividade / Ano	2019	2020
Inspeções	1426	969
Advertências	221	92
Multas	96	69
Interdições	11	4

Fonte: Adaptado de Cetesb (2020)

2.2 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

A Lei nº 12.305/10 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aborda importantes aspectos ambientais, sociais e econômicos para a viabilização do manejo dos RSU no país. A Figura 2.4 apresenta os processos de produção de resíduos até sua destinação final.



Figura 4 Fluxograma da produção de resíduos

Fonte: Adaptado de Pensamento Verde (2021)

Com o objetivo de maximizar a recuperação energética, a PNRS determina o tratamento dos RSU e sua transformação em rejeito (material inerte), antes de ser encaminhado a aterro sanitário.

Para cumprir as diretrizes da PNRS, a disposição de resíduos em aterro sanitário deve ser bem gerenciada pelo municípios. Os municípios também devem

abranger a coleta seletiva e, se possível, o tratamento dos resíduos orgânicos, além de plano de gerenciamento de RSU. Assim, como consequência do correto manejo e tratamento dos RSU, haveria a diminuição (ou até mesmo a extinção) de aterros controlados e lixões, refletindo as diretrizes da PNRS.

De acordo com a Associação Brasileira de Tratamento de Resíduos e Afluentes (ABTRE, 2020), a disposição inadequada de RSU tem diminuído, mas ainda é pouco expressiva. Em 2019 existiam no Brasil 3.257 lixões em operação. Em 2020 esse número caiu para 2.707, representando uma redução de 17%. Ainda de acordo com a Abtre (2020) um dos fatores que pode acelerar a diminuição dos lixões é o Programa Nacional de Lixão Zero¹, que possui objetivo de extinguir os lixões existentes, além de apoiar os municípios com soluções adequadas de destinação de resíduos.

Desde a criação da lei nº 12.305/10 em agosto de 2010, o que se tem visto ao longo dos últimos 10 anos foi o aumento em 19% na geração dos RSU. O índice de geração per capita durante esse período aumentou em 9%. O Índice de coleta também aumentou nesse período (embora não tenha sido proporcional ao aumento de geração per capita), passando de 88% em 2010 para 92% em 2019 (ABRELPE, 2020). O aumento da coleta de RSU destaca-se como um ponto positivo da PNRS, pois mais municípios brasileiros passaram a ter coleta de RSU, passando de 3.152 em 2010 para 4.070 em 2019, o que corresponde a aproximadamente 30% de municípios aderentes ao programa.

Outra grande dificuldade é com o adiamento da meta de eliminação e recuperação dos lixões no país, e mesmo com o crescimento de 30% de adequação dos lixões, ainda está muito aquém do que se era esperado, pois de acordo com a PNRS esses lixões eram para ser extintos até 2014. Entretanto, conforme citado anteriormente, cerca de 6,3 milhões de toneladas de lixo por ano ainda são dispostas de maneira inadequada e, em muitos casos, esse lixo acaba abandonado no meio ambiente. Levando em consideração o tempo que um material como o plástico, por exemplo, leva para se decompor, esse lixo deve permanecer no meio ambiente por algumas gerações.

Com a PNRS, a logística reversa foi estabelecida como instrumento de responsabilidade compartilhada por meio do ciclo de vida dos produtos, o intuito era priorizar o retorno para um novo ciclo de aproveitamento, fazendo com que as embalagens, por exemplo, fossem reprocessadas e reutilizadas em um novo processo de fabricação.

¹ “O Programa Lixão Zero” é um programa da Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana do Ministério do Meio Ambiente, para acelerar a questão dos resíduos sólidos urbanos, de forma que haja fortalecimento na gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos, coleta seletiva, reciclagem, logística reversa, recuperação energética e disposição adequada dos rejeitos

Um exemplo de logística reversa implantada é o Programa do Instituto Jogue Limpo², presente em 18 estados e também no Distrito Federal, que vem expandindo nos últimos anos e atualmente conta com 177 pontos de entrega voluntária. A título de comparação, os 4.310 municípios que possuem o Programa implementado receberam, em 2010, 1.149 toneladas de embalagens plásticas de óleos lubrificantes, das quais 1.118 toneladas foram recicladas. Em 2019, esses municípios receberam 5.036 toneladas, das quais 4.718 foram recicladas (ABRELPE,2020).

O programa Jogue Limpo contrata empresas operadoras logísticas que realizam a coleta e o recebimento das embalagens de óleos lubrificantes. Os veículos são equipados com alta tecnologia, atendendo requisitos de segurança e cuidados com o meio ambiente. Nas centrais de recebimentos, as embalagens passam por um processo de descontaminação dos óleos lubrificantes residuais e, então, são drenadas, prensadas e até moidas, transformando-as em matérias-primas para novos produtos ou outros produtos plásticos.

Porém, a tratativa de logística reversa não parece ser tão simples de implantar. Um dos itens que segue sem avanço na implemenatação da logística reversa, são os de medicamentos domiciliares, que são classificados como resíduos perigosos (classe 1). Esse material tem um potencial de contaminação do meio ambiente muito elevado, e são descartados incorretamente. O Brasil é o sétimo país no mundo que mais consome medicamentos, e até 2023 pode chegar a quinta posição. Com isso, em 2020, o Governo Federal publicou o decreto nº 10.388 de 5 de junho de 2020, que regulamenta o fluxo para descarte e destinação adequada para medicamentos vencidos ou em desuso, dividido em 2 fases: para municípios com até 500 mil habitantes, os pontos de coletas devem ser contemplados em até 2 anos e para municípios com até 100 mil habitantes, em até 5 anos (ABRELPE,2020).

A PNRS não trata exclusivamente do encerramento dos lixões, mas isso acaba sendo uma consequência da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos que deve estar refletida nas metas para a eliminação e recuperação destes lixões. Entretanto, após 10 anos da PNRS, pouco efetivamente foi colocado em prática. A quantidade de lixões existentes no país diminuiu, porém muito material ainda é descartado de forma inadequada. Houve pequenos avanços na coleta seletiva, mas ainda está muito longe do ideal. Ao mesmo tempo que o aumento da coleta é benéfica, o grande problema é a destinação incorreta dos RSU,

² O Instituto Jogue Limpo é uma associação de empresas fabricantes ou importadoras de óleo lubrificante. É a entidade gestora responsável por realizar a logística reversa das embalagens plásticas de óleo lubrificante usadas e de óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) (INSTITUTO JOGUE LIMPO, 2021)

visto que grandes quantidades ainda têm destinos inadequados, conforme apresentado anteriormente. Segundo a ABRELPE (2020), projeções realizadas indicam que em 2033 o país irá atingir a marca de 100 milhões de toneladas de RSU. Com isso liga-se um sinal de alerta sobre o destino de todo essa material, visto que a grande parte da população não tem ciência da PNRS e não separa os resíduos de forma adequada em suas residências. Portanto, deve haver maior divulgação e conscientização da população quanto a esses números preocupantes.

Ainda de acordo com a ABRELPE (2020), diante do cenário atual onde boa parte dos RSU ainda são destinados a aterros controlados e lixões, seria necessário 55 anos para o fim da destinação de forma inadequada no país.

3. SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE RSU

Este capítulo aborda os principais sistemas de disposição e tratamento de RSU disponíveis no Brasil, como aterros sanitários, tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU, bem como as tecnologias de tratamento térmico dos RSU (incineração e gaseificação) com foco na PNRS.

3.1 DISPOSIÇÃO DE RSU

No Brasil a maior parte dos RSU coletados segue para a disposição em aterros sanitários. Somente na última década houve um aumento de 10 milhões de toneladas, que passou de 33 milhões de toneladas em 2010 para 43 milhões de toneladas em 2019. Entretanto, a quantidade de RSU depositada de maneira incorreta em aterros controlados e lixões também registrou um aumento gradativo, passando de 25 milhões de toneladas em 2010 para pouco mais de 29 milhões de toneladas em 2019 (ABRELPE,2020) . A Figura 5. apresenta o crescimento do volume de RSU dispostos nos diferentes destinos na última década.



Figura 5. Aumento da disposição de resíduos na ultima década

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2020)

O aterro sanitário é considerado o único meio de disposição de RSU ambientalmente correto, pois possui procedimentos de destinação adequada, dentre eles: distância média de 200 metros de qualquer curso d'água como mananciais e abastecimento público; logo acima do solo compactado do aterro deve haver uma camada impermeável de polietileno de alta densidade (PEAD), para que não haja infiltração de líquidos nos solo, protegendo os lençóis freáticos de contaminação; sistema de drenagem de chorume gerado na decomposição do RSU e; sistema de drenagem de gases para a coleta do biogás gerado no interior do aterro sanitário (Cetesb, 2017). O biogás coletado é conduzido por tubulações para seus usos finais. O chorume geralmente é armazenado em tanques e mais tarde transportado para Estações de Tratamento de Ffluentes (ETE's). Todos os aterros sanitários devem ser monitorados e possuir estrutura que limite o acesso de pessoas não autorizadas e animais, além de possuir balança para controle de quantidade da entrada de resíduos (VGR Resíduos ,2018). A Figura 6. apresenta o esquema de um aterro Sanitário.

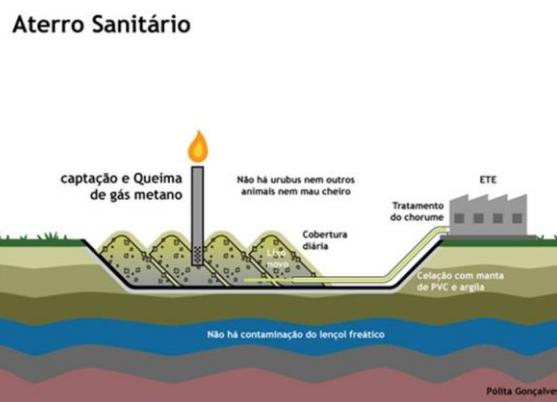


Figura 6 Aterro Sanitário

Fonte: Plataforma ituiutaba,2021

O aterro controlado é uma categoria intermediária entre aterro sanitário e lixão. É coberto por uma camada de argila e grama, evitando acesso aos animais. O chorume é coletado e levado para a pilha do resíduo, diminuindo assim a absorção pela terra. Neste tipo de aterro não há impermeabilização do solo, não há controle dos gases provenientes da decomposição dos RSU, nem há tratamento do chorume, portanto, não é possível evitar a contaminação do solo, do lençol freático e do ar. Por esses motivos o aterro controlado é

considerado uma das formas inadequadas de disposição dos RSU (VGR Resíduos, 2020). A Figura 7. apresenta o esquema de um aterro controlado.

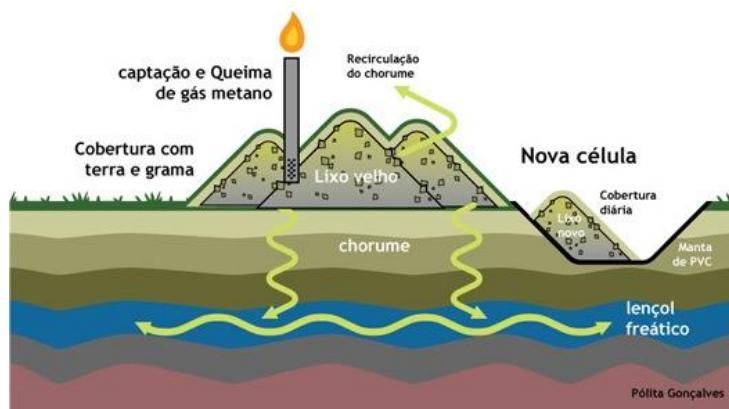


Figura 7 Aterro Controlado

Fonte: trilhoambiental.2021

Outra forma de disposição inadequada dos RSU é o lixão a céu aberto, onde os resíduos são simplesmente depositados no solo sem qualquer cuidado; não há controle ambiental ou sanitário, além de todo o lixo coexistir com pessoas e animais, expondo-os à contaminações variadas. Neste caso também há contaminação do ar, solo e lençol freático. O lixão é ambientalmente e socialmente a pior situação de disposição de RSU, pois não existe critério técnico para essas implementações (Coelho et. al., 2018). A figura 8. apresenta o esquema de um lixão a céu aberto

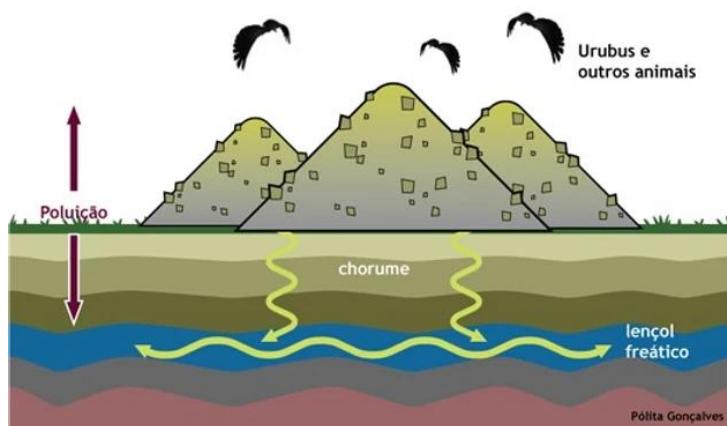


Figura 8 Lixão a céu aberto

Fonte: trilhoambiental.2021

Além dos métodos de disposição dos RSU apresentados, existem tecnologias que visam o correto tratamento dos resíduos, como o tratamento biológico e o tratamento

térmico, além de possibilitar a geração de energia, proporcionando a redução do consumo de combustíveis fósseis e/ou da energia proveniente da rede da concessionária local. Os itens a seguir apresentam os tratamentos adequados aos RSU.

3.2 TRATAMENTO DE RSU

Além da disposição em aterros sanitários (forma adequada de disposição sob o ponto de vista ambiental), os RSU podem ser tratados de diversas maneiras distintas, como (i) tratamento biológico da fração orgânica e, (ii) tratamento térmico (gaseificação e incineração), conforme apresentado nos itens a seguir.

3.2.1 TRATAMENTO BIOLÓGICO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RSU

O processo de tratamento anaeróbico da fração orgânica dos RSU, é uma tecnologia a ser considerada para o tratamento dos RSU, pois trata-se de um sistema que atua na redução da emissão de metano e da contaminação ambiental, ocasionada pelo descarte inadequado dos resíduos no ecossistema (Coelho et. al., 2020).

A biodigestão anaeróbica, que na maioria das vezes ocorre naturalmente, também podem ser reproduzida nos equipamentos denominados biodigestores, para tratar biomassas de diferentes origens, como efluentes industriais, dejetos animais e resíduos sólidos orgânicos, que podem gerar grande prejuízo ao meio ambiente se estiverem livres na natureza.

O processo de biodigestão anaeróbica necessita de tempo de retenção hidráulica³ sob condições ideais, tanto de temperatura como de agitação. O processo ocorre com a ausência total de oxigênio, onde as colônias mistas de microrganismos passam a proliferar, assim alimentando dos sólidos solúveis da biomassa em tratamento, provocando a degradação da matéria orgânica. Esse processo ocorre em quatro etapas, a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Coelho et. al., 2018)

A hidrólise é o primeiro processo em que ocorre a degradação anaeróbica, as bactérias presentes liberam enzimas por reações bioquímicas, que decompõem os compostos orgânicos em compostos dissolvidos e aminoácidos.

A segunda fase é a acidogênese, onde ocorre a absorção dos compostos provenientes da hidrólise e liberação de substâncias simples, como ácidos graxos voláteis e compostos minerais.

³ Tempo de retenção hidráulica é o tempo médio que os desjetos líquidos ficam acondicionados a uma unidade de tratamento.

A terceira fase é a acetogênese, que por meio da oxidação dos compostos da fase anterior são gerados os substratos apropriados para os microorganismos metagênicos, que realizam a degradação dos ácidos graxos e álcoois que dão origem aos ácidos acéticos, hidrogênio e dióxido de carbono.

A quarta e última fase é a metanogênese, que é compostas por bactérias anaeróbicas que transformam os ácidos formados na fase anterior em metano, que é o principal constituinte do biogás. Os principais processos que influenciam em toda essa etapa de biodigestão anaeróbica é a ausência de oxigênio, composição do substrato, temperatura e ph do meio (Coelho et. al., 2018).

Nesse caso, o RSU passa pelo processo de triagem que possui objetivo de separar o material reciclável, que pode ser comercializado, e a matéria orgânica, que pode ser enviada para tratamento em biogestores anaeróbicos, onde acontece a produção de biogás e, consequentemente, seu aproveitamento energético, assim como ocorre em aterros sanitários.

Dentre as principais vantagens do processo de biodigestão anaeróbica da fração orgânica dos RSU, destaca-se o aumento da vida útil dos aterros sanitários, pela triagem realizada nos compostos, para que haja separação dos produtos recicláveis e também de matéria orgânica, o que acarreta na diminuição significativa dos resíduos neles depositados; a diminuição de gases que contribuem para mudanças climáticas; redução do chorume e de odores nos aterros sanitários, por remoção dos resíduos orgânicos dos RSU (ENERGIA E BIOGAS,2020).

É importante destacar que a fração orgânica dos RSU também pode sofrer outro tipo de tratamento biológico, o tratamento aeróbico, que é o caso da compostagem. Entretanto, no processo de compostagem não há produção de biogás (ocorre apenas a formação de CO₂) e, consequentemente, não há possibilidade de geração de energia.

A compostagem dos RSU trata-se de um processo biológico que utiliza os resíduos orgânicos através da fermentação natural causadas por microorganismo (fungos e bactérias). O processo de compostagem é dividido em três fases. A primeira delas é a fase mesofílica, onde os microorganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (fungos e bactérias mesófila, ativas a temperatura ambiente) metabolizam as células mais simples à temperatura moderada (40° C aproximadamente). Esta primeira fase dura em torno de 15 dias. A segunda fase é a termofílica, onde acontece a degradação das moléculas mais complexas, realizada por fungos e bactérias termofilas, que são capazes de suportar temperaturas de até 70°C. Esta fase pode durar até 60 dias sendo a mais longa da compostagem. E por fim, a terceira e última fase, que é a fase da maturação, onde há

diminuição das atividades dos microorganismos e estabilização do composto. Esta fase permite a produção de um composto maturado, que dará origem ao húmus, que é um material que pode ser utilizado como adubo orgânico por ser rico em nutrientes e minerais, podendo substituir os fertilizantes sintéticos (EMBRAPA, 2020).

3.2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DOS RSU

Além dos aterros sanitários, cuja forma de disposição de RSU é considerada adequada, e do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU, onde em ambos os casos acontece a produção de biogás e seu aproveitamento energético, existem outros sistemas possíveis de tratar os RSU corretamente: os denominados Waste to Energy (WtE), como a gaseificação e a incineração. Nestes casos, também é possível gerar energia, o que proporciona a redução do consumo de combustíveis fósseis, além de ir ao encontro dos objetivos preconizados pela PNRS.

3.2.2.1 INCINERAÇÃO

A incineração é um processo que realiza a conversão dos resíduos em calor, escoria, cinzas e gases de combustão. O calor produzido pode ser utilizados em processos produtivos ou ainda pode gerar vapor em caldeiras e, por meio de turbinas, gerar energia elétrica (COELHO ,et al, 2020).

Essa é uma maneira eficiente de compactar os grandes volume de RSU , e também diminuir as emissões de metano que ocorrem com o despejo de RSU em aterros sanitários, aterros contolados ou lixões.

Geralmente o processo de incineração ocorre em dois estágios. Primeiramente o resíduo é queimado na câmara primária a altas temperaturas, podendo variar entre 500 a 900°C, temperatura suficiente para transformar essas substâncias em gases ou permitir que assumam a forma de pequenas partículas. Essa operação é controlada para que não tenha uma grande volatilidade de quantidades de metais pesados, presentes nos RSU, assim como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio etc, minimizando também a formação de óxidos nitrosos, que aparecem somente em temperaturas mais elevadas (MORAGADO & FERREIRA, 2006).

Já no segundo estágio, esses gases gerados na cabine primária são queimados a uma temperatura de 1.250°C e esse processo é dimensionado pra que haja a queima completa, podendo ser necessário a utilização de um combustível auxiliar para garantir a

queima, caso os resíduos utilizados no processo estejam muito úmidos (MORAGADO & FERREIRA, 2006). A Figura 9. demonstra o processo de incineração.

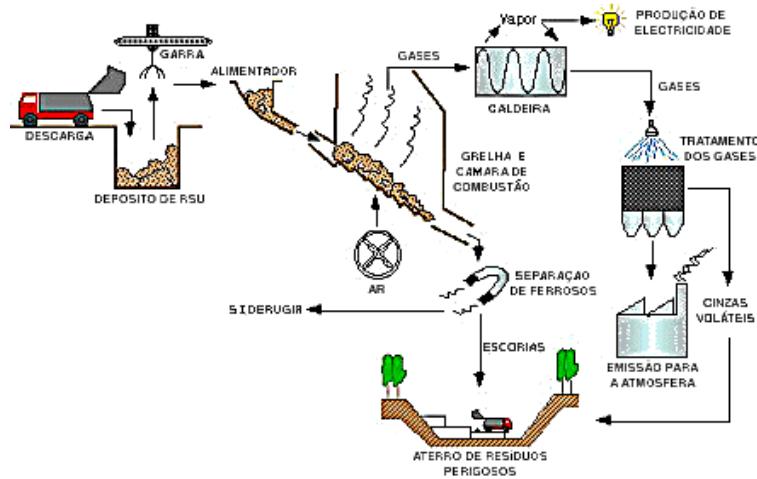


Figura 9 Incinaração

Fonte: sobiologia,2021

Todo esse processo abre um precedente para o aproveitamento energético, pois o calor proveniente dos gases de exaustão do segundo estágio pode ser aproveitado para a geração de energia elétrica ou de energia térmica.. Além dos gases, o processo de incineração também gera outros subprodutos, as cinzas, que devem ser encaminhadas a aterros sanitários.

Segundo a ABREN (2020), o potencial energético estimado proveniente das usinas de tratamento térmico dos RSU somente em regiões metropolitanas é equivalente a 2,4 GW (1,85%) da matriz nacional, com uma geração anual de 14.400 GWh, o que corresponde a 2,74% de toda a geração do país, considerando um fator de capacidade acima de 90%. Essa energia gerada pode ser injetada perto dos consumidores (geração distribuída). Entretanto, a incineração ainda enfrenta grandes barreiras, como altos custos de investimentos (Capex e Opex), que consequentemente também eleva o custo da energia gerada. Além disso, segundo Coelho et. al. (2020), a implementação de sistema de incineração só é viável em grandes municípios, acima de 1 milhão de habitantes, que possuem capacidade instalada acima de 10 MW.

É importante salientar também que no Brasil ainda não há planta de incineração de RSU em operação. As plantas de incineração existentes correspondem ao tratamento térmico de resíduos perigosos, como os resíduos hospitalares, por exemplo, e, nestes casos, não é possível realizar o aproveitamento energético dos resíduos.

3.2.2.2 GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é um processo de queima incompleta de um material orgânico, ou seja, processo onde ocorre a oxidação parcial do resíduo, a altas temperaturas (geralmente entre 500 e 1.400 °C), em condições subestequiométrica, que proporciona a formação de um gás combustível chamado de gás de síntese (também conhecido como syngas), composto basicamente por monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H₂). Dependendo das condições do processo, o gás de síntese pode conter em sua composição outros componentes, como metano, nitrogênio e hidrocarbonetos (Coelho et. al., 2020; CARBOGAS, 2020).

Uma Planta de gaseificação é dividida em três blocos distintos, podendo ou não coexistir no mesmo espaço físico: (i) unidade de recepção de RSU; (ii) unidade do gaseificador; (iii) unidade de geração de energia (INFIESTA, 2015)

A unidade de recepção de RSU é a unidade que processa mecanicamente o material recebido, podendo receber auxilio de pessoal ou não, dando origem ao Combustível Derivado de Resíduo (CDR). O CDR é obtido após o processo de secagem, separação e Trituração dos RSU e pode ser armazenado por até 4 meses, possibilitando sua produção em local destinto do gaseificador.

A unidade do gaseificador é o local onde converte a energia potencial contida no CDR em gás.

Na unidade de geração de energia todo o gás de síntese produzido é utilizado para a geração de energia elétrica ou térmica, seja em grupos geradores (motor ciclo Otto) ou em turbinas a gás ou vapor (ciclo Rankine). A Figura 10. demonstra o processo de gaseificação.



Figura 10 processo de gaseificação

Fonte: erbr.2021

4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU NO BRASIL

Este capítulo aborda o panorama do aproveitamento energético dos RSU no Brasil. Esse cenário está consolidado com o aproveitamento energético proveniente dos RSU através do biogás de aterro sanitário.

Porém, conforme apresentado por ABREN (2020), países da união europeia, Estados Unidos, China e Índia consideram que os RSU sejam tratados com tecnologias WTE, pois os RSU são destinados a um meio sustentável e contribuem para energia limpa e renovável.

Esses processos de incineração e gaseificação (WTE) ainda são incipientes no Brasil, pois os fatores para a não utilização dessas tecnologias são, principalmente, os altos investimentos em Capex e Opex, em especial o processo de incineração, que também exige enorme quantidade de RSU para ser viável técnica e economicamente. Porém, de acordo com a ABREN (2020), o que tem chamado a atenção é que uma planta WTE possui eficiência energética quase dez vezes maiores, quando comparada à planta de aproveitamento energético do biogás proveniente de aterro sanitário.

Este capítulo também irá apresentar alguns cases referentes ao aproveitamento energético dos RSU por meio de aterros sanitários e sistema de gaseificação (ainda em implementação).

4.1 BIOGÁS NO BRASIL E SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

De acordo com o CIBiogas (2020) , em 2020 existiam 675 plantas de biogás no Brasil para fins energéticos. Desse total, 638 estavam em operação no mesmo ano, o que corresponde a 94 % das plantas identificadas, com uma geração total de 1,83 bilhão de Nm³/ano de biogás.

O biogás que é gerado em aterros sanitários e em Estação de Tratamento de Efluentes (ETE's), possuem juntos 57 plantas, que representam cerca de 9% das plantas em operação, porém, o volume produzido equivale a 73% de todo biogás produzido, com um total de 1,34 bilhão de Nm³/ano (CIBIOGAS, 2020)

A grande maioria das plantas de aproveitamento energético dos RSUs são em aterros sanitários. As principais aplicações energéticas são a geração de energia elétrica, térmica, mecânica ou biometano, porém a que é mais representativa é a energia elétrica com 85% das plantas, consumindo assim até 73% do volume do biogás produzido (CIBIOGAS, 2020).

O setor cresceu de 2015 a 2019 em média de 20% a.a; já em relação ao ano de 2020 esse crescimento atingiu 23%. Conforme CIBiogas (2020), o potencial nacional de biogás é estimado em 82,58 bilhões de Nm³/ano, assim é possível expandir a produção de biogás em todo o país

em torno de 98%, potencial esse que pode ser explorado e pode contribuir com a demanda energética do país.

De acordo com a CIBIOGAS (2020) o Brasil gerou, em 2020, um total 1,83 bilhão Nm³de biogás, o que corresponde à geração de aproximadamente 3,2 milhões de MWh de energia elétrica e cerca de 943 milhões de m³ de biometano.

4.2 BIOGÁS EM SÃO PAULO E SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

São Paulo destaca como o maior produtor de Biogás no país, pois, de acordo com o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, sua participação na produção é o equivalente a 1.528.007.602 milhões de Nm³/ano de biogás proveniente de aterro sanitário. Se todo esse volume de biogás fosse utilizado para a geração de energia elétrica, possibilitaria a geração de aproximadamente 3.120.220 MWh/ano para o estado (Coelho et. al., 2020)

Considerando o volume de biogás produzido a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU, ainda segundo o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo, esse número seria o equivalente 737.962.17 milhões de Nm³/ano e possibilitaria a geração de aproximadamente 1.638.129 MWh de energia elétrica para o estado (Coelho et. al., 2020)

O potencial de biometano proveniente de aterro sanitário, conforme o Atlas de bioenergia do estado de São Paulo tem o total de 787.632.784 Nm³/ano (Coelho et. al., 2020)

Para o tratamento da Fração Organica de RSU conforme o Atlas de bioenergia do estado de São Paulo o volume de biometano disponível é o total de 418.432.163 Nm³/ano.

4.3 Cases de Aproveitamento Energético dos RSU

4.3.1 Termoverde Caieiras e Salvador

Um Grupo pioneiro no aproveitamento energético dos RSU é o Grupo Solvi, que atua nos segmentos de gestão de resíduos, saneamento e energia renovável. Em 2011 implantou a primeira termelétrica a biogás de aterro sanitário do Nordeste, localizada na área da UVS-BATTRE, no site do Aterro Metropolitano Centro - AMC.

A denominada Termoverde Salvador tem uma capacidade de geração a partir do biogás de 15 MW de potência instalada. Esse projeto foi tão bem sucedido que o grudo expandiu pelo Brasil com outras plantas (TERMOVERDE, 2020).

Em meados de julho de 2016 entrou em operação a Termoverde Caieiras, que foi construída em uma área 15.000 m² e começou a operar com a autorização da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica). Situada na Central de Tratamento e Valorização Ambiental da

Essencis, no município de Caieiras-SP, no km 33 da Rodovia Bandeirantes, é a maior termelétrica movida a biogás de aterro sanitário do Brasil e também uma das maiores do mundo. A Termoverde Caieiras possui 29,5 MW de potência instalada, o suficiente para atender uma cidade de até 300.000 habitantes. A Figura 11. representa a Termoverde Caieiras (TERMOVERDE,2020)



Figura 9 Planta Termoverde Caieiras

Fonte: Termoverde ,2020

O biogás utilizado como combustível na geração de energia elétrica é resultado da decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos depositados no aterro da Essencis. é importante ressaltar que o aproveitamento energético do biogás é uma forma sustentável de valorizar essa gás, além possibilitar a geração de créditos de carbono⁴.

4.3.2 Aterro de Gramacho e de Seropédica.

O Aterro Sanitário de Gramacho está localizado no bairro Jardim Gramacho, no município de Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro. O aterro operou durante 34 anos, desde 1978, quando foi inaugurado, até 2012, quando oficialmente encerrou as atividades de recebimento de RSU.

Durante todos esses anos de operação, o aterro sanitário de Gramacho recebeu RSU dos principais municípios metropolitanos, além do próprio RJ, acumulando um total entre 60 e 80 milhões de toneladas de RSU (DIÁRIO DO RIO.COM, 2019)

Após seu encerramento, em 2013 o aterro sanitário de Gramacho, o maior da América Latina, implementou uma usina de biogás, com capacidade de geração de 160 milhões de

⁴ Crédito de carbono é um conceito que surgiu no protocolo de Kyoto em 1997, que visa a diminuição dos gases de efeito estufa (GEE). Os créditos de carbono representam a não emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

m³ de biogás por ano (ECODEBATE, 2021). A Figura 12. apresenta uma vista aérea do aterro de Gramacho.



Figura 10 Aterro Gramacho Fonte: O Globo,2021

Entretanto, em 2019, por não apresentar mais o volume de biogás suficiente, a planta de biogás do aterro de Gramacho foi transferida para o Aterro Sanitário de Seropédica, também localizado no estado do Rio de Janeiro. O aterro Seropédica realiza a purificação do biogás captado por meio da remoção do CO₂, enxofre e outros contaminantes, dando origem ao biometano, que possui em sua composição 95% de metano. Esse biometano é comprimido e comercializado para clientes industriais e distribuidores de combustíveis. Entretanto, de acordo com a concessionária local, Gás Verde S/A, dependendo da regulamentação do mercado de gás, há possibilidade do biometano ser comercializado para injeção na rede de distribuição de gás natural. (ABEGAS,2019)

4.3.3 Aterro GNR Fortaleza

Em abril de 2018 foi inaugurada a GNR Fortaleza em parceria com as Marquise Ambiental e a Ecometano. A Figura 13. apresenta a planta da Usina de GNR Fortaleza.



Figura 11 Usina de GNR Fortaleza

Fonte: ecometano,2021

A planta está localizada no aterro Municipal Oeste de Caucaia/Fortaleza, recebe diariamente cerca de 3 mil toneladas de resíduos sólidos domiciliares da região metropolitana de Fortaleza. A planta e conta com um sofisticado sistema de *upgrading* do biogás, com capacidade de produção de 90 mil m³ de biometano por dia, tornando a segunda maior nesse quesito do país. Esse biometano é injetado na rede de gás natural da concessionária local e é capaz de suprir cerca de 20% do gás natural consumido no setor residencial do Ceará.(Grupo Marquise, 2018) .

Com a instalação da GNR Fortaleza é possível evitar a emissão de metano que é 25 vezes mais nocivo como gás de efeito estufa, quando comparado ao CO₂.

A previsão é expandir esse volume diário para cerca de até 150 mil m³ de biometano, o suficiente para o atendimento de gás natural veicular (GNV) em mais de 10 mil automóveis por dia (CICLOVIVO,2018).

4.3.4 Carbogas Boa Esperança -Mg

Em meados de 2016 houve um projeto piloto entre a empresa Carbogas e a usina de Furnas, para estudo de viabilidade do projeto e geração de energia através da solução de gaseificação.

O projeto piloto aconteceu em uma planta experimental na sede da Carbogas em Mauá, na grande São Paulo. Após a conclusão dos teste, confirmou-se a viabilidade com essa nova tecnologia, e que as taxas de emissões estavam dentro dos padrões estabelecidos na europa (PENSAMENTO VERDE,2017).

Para que isso fosse possível foi utilizado um processo termoquímico para a produção de gases combustíveis, aplicados em caldeiras e turbinas a vapor, assim gerando energia elétrica sem a emissão de poluentes.

A segunda fase do projeto corresponde à implementação da Usina Termoquímica no município de Boa Esperança/MG, também conhecida como Usina de Furnas. Essa instalação ocupa uma área de 7.800 m² e possui capacidade de processar 47 toneladas de RSU para a geração de aproximadamente 1 MW de energia (cerca de 8 mil magawatts hora por ano) (PREFEITURA BOA ESPERANÇA, 2017). É importante salientar que este projeto encontra-se em implementação.

Estima-se que essa usina possa atender em torno de 40 mil pessoas, porém essa plantas poderiam ser instaladas em locais com uma população maior (COELHO et. al., 2020). Figura 2.12 Usina de Furnas x Carbogas



Figura 12 Usina de Furnas X Carbogas

Fonte:sintonize aqui, 2019

5. ESTUDO DE CASO – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RSU NO VALE DO RIBEIRA

Este capítulo aborda o panorama dos RSU no Vale do Ribeira, região de estudo de caso, bem como o potencial energético disponível na região. É apresentada ainda uma breve análise dos resultados obtidos, bem como dos principais aspectos ambientais envolvidos no tratamento/destinação dos RSU, com foco na região do estudo

5.1 PANORAMA DOS RSU NO VALE DO RIBEIRA

O Vale do Ribeira, localizado na região Sul do Estado de São Paulo, abrange 25 municípios⁵ e ocupa uma área de 2.830.666 hectares (BRASIL, 2015).

De acordo com o IBGE (2017), sua população em 2017 era de 464.568 habitantes, o que proporcionou a geração de aproximadamente 93.765 toneladas de RSU no mesmo ano, conforme apontado pelo inventário anual da Cetesb (2017).

Em comparação ao ano de 2020, o IBGE (2020) contabilizou 467.529 habitantes, o que significa a geração de aproximadamente 94.542 toneladas de RSU ⁶.

Conforme a CETESB(2020), no ano de 2020 foram coletadas 94.315 toneladas de RSU no Vale do Ribeira. De todo o RSU coletado nessa região, 84% é encaminhado para outros municípios e dispostos de forma adequada em aterros sanitários, os outros 16%, que correspondem às cidades de Apiaí, Itapirapua Paulista, Pedro de Toledo e Ribeira, ainda destinam os RSUs de forma inadequada, correspondendo a um total 7.332 toneladas ano. A Tabela 5.1 apresenta a destinação adequada dos RSU coletados em cada município que compõe o Vale do Ribeira. A tabela 2. apresenta os resíduos coletas com destinação inadequada. As informações necessárias para a composição dessas tabelas foram extraídas do documento da CESTESB - Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (CETESB, 2020).

⁵ Municípios que fazem parte do Vale do Ribeira: Apiaí, Barra do Chapéu, Barra do Turvo, Cajati, Eldorado, Ilha Cumprida, Iguape, Iporanga, Itaóca, Itapirapuã Paulista, Itariri, Jacupiranga, Juquiá, Juquitiba, Miracatu, Paraguaçu, Pedro de Toledo, Registro, Ribeira, São Lourenço da Serra, Sete Barras e Tapiraí.

⁶ Estimativa de geração de RSU nos municípios obtida a partir da metodologia apresentada CETESB,2020

Tabela 5.1 Destinação Adequada de 21 cidades e volume anual

Cidade	Status	IQR	t/dia	t/ano
Barra do Chapéu	Adequado	7	1	434
Barra do Turvo	Adequado	9	2	799
Cananeia	Adequado	10	7	2.734
Cajati	Adequado	7	15	5.318
Eldorado	Adequado	9	5	1.953
Iguape	Adequado	9	21	7.745
Ilha Comprida	Adequado	9	8	2.902
Iporanga	Adequado	10	2	599
Itaóca	Adequado	8	1	464
Itariri	Adequado	9	8	2.873
Jacupiranga	Adequado	8	7	2.489
Juquia	Adequado	9	8	3.015
Juquitiba	Adequado	9	17	6.256
Miracatu	Adequado	9	7	2.581
Pariquerá Açu	Adequado	10	9	3.460
Peruibe	Adequado	9	55	19.922
Registro	Adequado	9	40	14.618
Ribeirão Branco	Adequado	8	6	2.106
São Lourenço da Serra	Adequado	9	10	3.716
Sete Barras	Adequado	9	5	1.807
Tapirai	Adequado	9	4	1.420

Fonte: Adaptado Cetesb(2020)

Tabela 5.2 com destinação inadequada e volume anual

Cidade	Status	IQR	t/dia	t/ano
Apiaí	Inadequado	2	12	4.475
Itapirapuã Paulista	Inadequado	4	1	533
Pedro de Toledo	Inadequado	4	6	2.011
Ribeira	Inadequado		1	314

Fonte: Adaptado Cetesb(2020)

5.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RSU NO VALE DO RIBEIRA

5.2.1 RSU em aterro sanitário

Para realização do potencial de geração de biogás, biometano e energia elétrica a partir dos RSU em aterros sanitários, considerou-se que todo o volume de RSU coletado nos municípios foi enviado para aterro sanitário.

Os cálculos aqui apresentados para a determinação dos potenciais disponíveis a partir da disposição de RSU em aterro sanitário seguiram a mesma metodologia reportada no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et. al., 2020).

Para que fosse possível calcular a quantidade de metano possível de ser obtido por meio dos RSU do Vale do Ribeira depositados em aterro sanitário, foi necessário primeiro calcular a fração de carbono orgânico degradável no RSU de acordo com a composição gravimétrica do RSU adotada no estudo, conforme metodologia do IPCC (2006). O cálculo da fração de carbono orgânico degradável foi realizado por meio da Equação 1.

A composição gravimétrica adotada no estudo é a mesma que consta no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do município Barra do Turvo, que compõe o Vale do Ribeira, conforme apresentado na Tabela 5.3 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRA DO TURVO, 2015).

Tabela 5.3. Composição gravimétrica média dos RSU.

Resíduo	Composição (%)
Matéria orgânica	51,41
Recicláveis Secos (papel, papelão, plástico, metal e vidro)	31,9
Outros (rejeitos)	16,69
TOTAL	100

Fonte: PREFEITURA DE BARRA DO TURVO, 2015.

$$\text{DOC} = \sum (\text{DOC}_i \times W_i) \quad (\text{equação 1})$$

Onde :

DOC= fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU)

DOC_i= fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduos i

W_i= fração do tipo resíduo i por categoria de resíduo.

Com o resultado da fração de carbomo orgânico degradável, foi então realizado o cálculo do potencial específico de geração de metano a partir de RSU depositado em aterros sanitários, conforme a Equação 2.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times (16/12) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

L₀ = Potencial de geração de metano de RSU depositado em aterro sanitário (tCH₄/tRSU)

MCF = Fator de correção de metano; igual a 1 para aterro bem gerenciado (aterro sanitário), conforme assumido neste estudo (IPCC, 2006)

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU)

DOC_f = Fração do DOC degradada (tC/tRSU); igual a 0,50 (IPCC, 2006)

F = 50 % (porcentagem de metano presente no biogás de aterro sanitário, BRASIL, 2019)

(16/12) = Conversão de carbono (C) em metano (CH₄)

O valor de L₀ obtido pela Equação 2 está em (tCH₄/tRSU). Portanto, para transformar a unidade para (Nm³CH₄/tRSU) deve-se dividir o resultado de L₀ pela densidade do metano (0,0007168 tCH₄/ m³CH₄ – AMARAL, et. al., 2017).

O cálculo do potencial de geração de metano nos municípios do Vale do Ribeira (em Nm³/ano) foi realizado multiplicando o valor obtido de L₀ (Nm³/tRSU) pela quantidade total de RSU coletado em cada município (conforme Tabelas 5.1 e 5.2), considerado que 100% dos RSU foi encaminhado para aterro sanitário.

De acordo com Brasil (2019) estima-se que o biogás proveniente de aterro sanitário tenha em sua composição 50% de metano.

Segundo Leme (2010), nem todo o biogás gerado em aterro sanitário é possível de ser coletado. O autor estima uma perda de biogás na ordem de 25% (emissões não controladas). Diante deste fato, considerou-se neste estudo que somente 75% do biogás produzido é possível de captado e utilizado para fins energéticos.

A estimativa de geração de biometano foi feita com base na Resolução ANP 685/2017, que estipula a qualidade do biogás para essa finalidade.

Para calcular o potencial de biometano, foi considerado um valor médio de purificação do biogás de 97%, que refere-se à eficiência do processo de purificação com as tecnologias disponíveis no mercado. Os outros 3% representam as

impurezas residuais. O volume de biometano disponível foi calculado de acordo com a Equação 3.

$$V_{biom} = Biogás_{captado} * (Con.CH_4) \quad (\text{equação 3})$$

$\eta_{biometano}$

Onde:

V_{biom} = Volume de biometano produzido por ano, (Nm³ /ano)

$Biogás_{captado}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário, (Nm³ biogás captado/ano)
(75% do biogás é captado, considerando a eficiência do sistema de extração, conforme LEME, 2010)

$Con.CH_4$ = Concentração de metano no biogás de aterro sanitário (50% conforme BRASIL, 2019)

η = Eficiência de purificação do biogás (para transformação em biometano) (considerou-se 97% de eficiência).

Nesse estudo também foi considerada a possibilidade de geração de energia elétrica e foi levantado o potencial elétrico dos RSU em aterros sanitários para cada município do Vale do Ribeira, calculado conforme a Equação 4.

$$EE = (Biogás_{captado} \times Con_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}) \quad (\text{equação 4})$$

1000

Onde:

EE = Potencial de Geração de energia elétrica por ano (MWh/ano)

$Biogás_{captado}$ = Volume biogás captado de aterro sanitário dos municípios (Nm³ biogás/captado/ano)

$Con.CH_4$ = Concentração de metano presente no biogás de aterro sanitário (50% conforme Brasil,2019)

PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior do metano(kWh/Nm³CH₄) fator utilizado 9,97 kWh/Nm³CH₄,conforme (Bueno et al.,2016)

Ef_{ele} = foi considerada eficiência para conversão energética para motores de ciclo Otto a biogás, foi utilizado o fator de 0,35 para as vazões menores que 5.000 Nm³/dia e foi utilizado para acima de 5.000 Nm³/dia, metodologia fornecida pela (ABILOGAS,2018)

1000 = conversão de kWh para MWh

A Tabela 5.4 apresenta os municípios que compõem o Vale do Ribeira, o número de habitantes de cada município, e os resultados das equações acima, sendo assim possível verificar o potencial disponível de biogás, biometano, e energia elétrica na região estudada.

Tabela 5.4. Potenciais disponíveis a partir da disposição de RSU em aterro sanitário para os municípios que compõem o Vale do Ribeira

Município	População	RSU Gerado	% de coleta de RSU	RSU coletado	Volume de biogás captado Aterro (75%)	Volume de biometano produzido	Potencial de energia elétrica disponível
	hab	t/ano	%	t/ano	Nm ³ /ano	Nm ³ /ano	MWh/ano
Apiaí	24.081	4.475	100	4.475	439.811	226.707	767
Barra do Chapéu	5.794	434	100	434	42.690	22.005	74
Barra do Turvo	7.606	799	100	799	78.563	40.497	137
Cajati	28.441	5.318	100	5.318	522.679	269.422	912
Cananeia	12.542	2.734	100	2.734	268.694	138.502	469
Eldorado	15.592	1.953	100	1.953	191.924	98.930	335
Iguape	31.117	7.745	100	7.745	761.239	392.391	1.328
Ilha Comprida	11.552	2.902	100	2.902	285.196	147.008	498
Iporanga	4.180	599	100	599	58.833	30.326	103
Itaóca	3.332	464	100	464	45.560	23.484	79
Itápirapuã Paulista	4.294	533	100	533	52.376	26.998	91
Itariri	17.754	2.873	100	2.873	282.326	145.529	493
Jacupiranga	17.911	2.489	100	2.489	244.658	126.113	427
Juquia	18.627	3.015	100	3.015	296.317	152.740	517
Jucuítiba	31.844	6.256	100	6.256	614.875	316.946	1.073
Miracatu	19.511	2.581	100	2.581	253.627	130.736	443
Pariquera Açu	19.797	3.460	100	3.460	340.082	175.300	593
Pedro de Toledo	11.507	2.011	100	2.011	197.664	101.889	345
Peruíbe	69.697	19.922	100	19.922	1.957.985	1.009.271	4.099
Registro	56.463	14.618	100	14.618	1.436.741	740.588	2.507
Ribeira	3.320	314	100	314	30.851	15.903	54
Ribeirão Branco	15.984	2.106	100	2.106	206.991	106.696	361
São Lourenço da Serra	16.127	3.716	100	3.716	365.194	188.244	637
Sete Barras	12.731	1.807	100	1.807	177.575	91.533	310
Tapirai	7.725	1.420	100	1.420	139.549	71.932	243
Total	467.529	94.542	100	94.542	9.291.999	4.789.690	16.895

Fonte: elaboração do autor

5.2.2 Biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSU

Os cálculos aqui apresentados para a determinação dos potenciais disponíveis a partir da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU seguiram a mesma metodologia reportada no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et. al., 2020).

Os RSU de cada município que compõe o vale do Ribeira foram quantificados de acordo com a Cetesb (2020) e foram apresentados anteriormente, nas tabelas 5.1 e 5.2.

A composição gravimétrica adotada no estudo é a mesma que consta no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do município Barra do Turvo, que compõe o Vale do Ribeira, conforme apresentado anteriormente, na Tabela 5.3 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRA DO TURVO, 2015).

Para quantificar a matéria orgânica presente nos RSU, considerou-se que todo o RSU coletado nos municípios do Vale do Ribeira foi encaminhado para o processo de triagem com o objetivo de separar a matéria orgânica e os produtos recicláveis. A quantidade de matéria orgânica presente no RSU e separada no processo de triagem corresponde a 51,41% do total do RSU coletado em cada município. Considerou-se neste estudo que toda essa matéria orgânica resultante da triagem é encaminhada ao processo de biodigestão anaeróbia, com consequente geração de biogás, a ser aproveitado para fins energéticos. A Equação 5 apresenta o cálculo realizado para a quantificação da matéria orgânica presente nos RSU.

$$\text{MO}_{\text{RSU}} = \text{RSU} * \% \text{ MO} \quad (\text{equação 5})$$

onde:

MO_{RSU} = quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano)

RSU = quantidade de RSU coletado em cada município (t/ano)

% MO= porcentagem de matéria orgânica presente no RSU (51,41%, conforme apresentado na Tabela 5.3)

Para quantificar o biogás proveniente do tratamento anaeróbio da fração orgânica do RSU, considerou-se o fator de produção de biogás por tonelada de RSU indicado por Achinas et al. (2017) (101,5 Nm³/t_{RSU}). Considerou-se também que neste cenário, o biogás produzido possui 55% de metano em sua composição (Achinas et al.. 2017). A Equação 6 apresenta o cálculo realizado para quantificar o volume de biogás proveniente do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU.

$$V_{biogas} = MO_{RSU} * F_{MO}$$
 (equação 6)

onde:

V_{biogas} = Volume de biogás produzido (Nm³/ano)

MO_{RSU} = quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano)

F_{MO} = fator de produção de biogás para o tratamento anaeróbico de matéria orgânica do RSU (101,5 Nm³ biogás/t de resíduo).

Para calcular o potencial de biometano foi utilizada a mesma equação apresentada anteriormente (Equação 3).

Para calcular o potencial de geração de energia elétrica utilizou-se a Equação 4 acima. Entretanto foi considerado que a concentração de metano presente no biogás do tratamento anaeróbio da fração orgânica do RSU é de 55%, conforme Achinas et al., (2017). A Tabela 5.5. apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.5. Potenciais disponíveis a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU para os municípios que compõem o Vale do Ribeira

Município	População	RSU Gerado	% de coleta de RSU	RSU coletado	Quantidade de Matéria Orgânica (MO)	Volume de biogás produzido	Volume de biometano produzido	Potencial de energia elétrica disponível
	hab	t/ano	%	t/ano	t/ano	Nm ³ /ano	Nm ³ /ano	MWh/ano
Apiaí	24.081	4.475	100	4.475	2.301	233.505	132.400	448
Barra do Chapéu	5.794	434	100	434	223	22.665	12.851	43
Barra do Turvo	7.606	799	100	799	411	41.711	23.651	80
Cajati	28.441	5.318	100	5.318	2.734	277.502	157.346	533
Cananeia	12.542	2.734	100	2.734	1.405	142.655	80.887	274
Eldorado	15.592	1.953	100	1.953	1.004	101.897	57.777	196
Iguape	31.117	7.745	100	7.745	3.982	404.159	229.162	776
Ilha Comprida	11.552	2.902	100	2.902	1.492	151.417	85.855	291
Iporanga	4.180	599	100	599	308	31.236	17.711	60
Itaóca	3.332	464	100	464	238	24.189	13.715	46
Itapirapuã Paulista	4.294	533	100	533	274	27.807	15.767	53
Itariri	17.754	2.873	100	2.873	1.477	149.893	84.991	288
Jacupiranga	17.911	2.489	100	2.489	1.280	129.895	73.652	249
Juquia	18.627	3.015	100	3.015	1.550	157.321	89.203	302
Juquitiba	31.844	6.256	100	6.256	3.216	326.450	185.101	627
Miracatu	19.511	2.581	100	2.581	1.327	134.656	76.351	258
Pariquera Açu	19.797	3.460	100	3.460	1.779	180.557	102.378	347
Pedro de Toledo	11.507	2.011	100	2.011	1.034	104.944	59.504	201
Peruibe	69.697	19.922	100	19.922	10.242	1.039.537	589.428	1.995
Registro	56.463	14.618	100	14.618	7.515	762.797	432.514	1.464
Ribeira	3.320	314	100	314	161	16.380	9.287	31
Ribeirão Branco	15.984	2.106	100	2.106	1.083	109.896	62.312	211
São Lourenço da Serra	16.127	3.716	100	3.716	1.910	193.889	109.937	372
Sete Barras	12.731	1.807	100	1.807	929	94.278	53.457	181
Tapirai	7.725	1.420	100	1.420	730	74.089	42.009	142
Total	467.529	94.542	100	94.542	48.604	4.933.326	2.797.247	9.468

Fonte: elaboração do autor

5.2.3 Tratamento térmico dos RSU (WtE)

Os cálculos aqui apresentados para a determinação dos potenciais disponíveis a partir do tratamento térmico dos RSU seguiram a mesma metodologia reportada no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et. al., 2020).

Os RSU de cada município que compõe o vale do Ribeira foram quantificados de acordo com a Cetesb (2020) e foram apresentados anteriormente, nas tabelas 5.1 e 5.2.

A composição gravimétrica adotada no estudo é a mesma que consta no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do município Barra do Turvo, que compõe o Vale do Ribeira, conforme apresentado anteriormente, na Tabela 5.3 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRA DO TURVO, 2015).

Para a estimativa do potencial de geração de energia elétrica, considerou-se que todo o RSU coletado nos municípios do Vale do Ribeira foi encaminhado para o processo de triagem com o objetivo de separar a matéria orgânica e os produtos recicláveis.

Conforme apresentado anteriormente, a quantidade de matéria orgânica presente no RSU (51,41% do total do RSU coletado em cada município) foi encaminhada ao processo de biodigestão anaeróbia, com consequente geração de biogás e seu aproveitamento energético, apresentado acima.

Em relação aos produtos recicláveis, considerou-se que 31,9% do total dos RSU coletados em cada município (conforme apresentado na Tabela 5.3) foram destinados ao processo de reciclagem.

O resíduo restante, que corresponde a 16,69% do total de RSU coletado nos municípios do Vale do Ribeira, foi encaminhado ao tratamento térmico, utilizando as tecnologias WtE (incineração e gaseificação).

Entretanto, conforme Coelho et. al. (2020), o uso de um sistema de incineração geralmente é mais indicado para capacidade instalada igual ou acima de 10MW, em cidades que tenham uma população acima de 1 milhão de habitantes, conforme apresentado na Tabela 5.6. Este caso não ocorrerá neste estudo em questão, pois os municípios analisados, que compõem o Vale do Ribeira, possuem população menores que 100.000 habitantes. Portanto, a tecnologia adotada para a determinação do potencial energético do tratamento térmico dos RSU foi a gaseificação.

Tabela 5.6: Potencial para geração de energia elétrica por tipo de tecnologia

População (habitantes)	Potência instalada por tecnologia
$\geq 1.000.000$	$\geq 10 \text{ MW}$ (incineração)
$\geq 60.000 \leq 1.000.000$	$\geq 1 \text{ MW} \leq 10 \text{ MW}$ (gaseificação leito fluidizado)
≥ 5.000	$\geq 75 \text{ kW}$ (gaseificação leito fixo)

Fonte: COELHO et. al., 2020

Para estimar o potencial de geração de energia elétrica proveniente da gaseificação dos resíduos resultantes do processo de triagem, é necessário que esses resíduos sejam transformados em CDR. Neste estudo considerou-se que PCI do CDR com 25% de umidade é igual a 3.225 kcal/ kg, conforme apresentado por Coelho et. al. (2020). Considerou-se ainda que o sistema opera 24 horas por dia, o que permite a estimativa da energia de entrada no sistema, efetuado pela Equação 7.

$$Ee = (V_{resíduo}) \times (PCI_{CDR}) \quad \text{equação 7}$$

Onde:

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

Vresíduo = volume de RSU (kg/h)

PCI_{resíduo} = Poder Calorífico Inferior do CDR (kcal/ kg)

Para quantificar a vazão de gás de síntese obtido no processo de gaseificação, foi considerado que a eficiência de conversão do CDR em gás de síntese é de 70% e que o PCI do gás de síntese é 1.160 kcal/Nm³ (COELHO et al, 2020). A Equação 8 apresenta o cálculo da vazão do gás de síntese.

$$Q = (Ee) / (PCI_{syngas}) \quad \text{(equação 8)}$$

Onde:

Q = Vazão do gás de síntese (Nm³/h)

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

PCI_{gás de síntese} = Poder Calorífico Inferior do gás de síntese (kcal/Nm³)

Para estimar a potência elétrica do sistema de gaseificação, considerou-se que o gás de síntese é encaminhado ao grupo gerador com ciclo Otto, com eficiência térmica do motor de 28% e fator de capacidade de 95% (COELHO et. al., 2020). A potência elétrica do gás de síntese no motogerador foi calculada por meio da Equação 9.

$$P = \frac{(Q) \times (PCI_{syngas}) \times (\eta)}{(\text{Fator de conversão})} \times (FC_{motor})$$

(equação 9)

Onde:

P = Potência disponível (MW);

Q = Vazão do gás de síntese (Nm³/h);

PCI_{gás de síntese} = Poder Calorífico Inferior do gás de síntese (kcal/Nm³);

η = Eficiência do motor ciclo otto (%)

FC_{motor} = Fator de capacidade do motor (%)

Fator de conversão (kcal/h para MW) = 860.000

Para o cálculo da energia elétrica disponível a partir da gaseificação dos resíduos resultantes do processo de triagem, considerou-se um fator de carga de 87% na geração de eletricidade (COELHO et. al., 2020). A Equação 10 apresenta o cálculo da estimativa de geração elétrica.

$$E = P \times F_{carga} \times \text{Tempo de operação}$$

(equação 10)

Onde:

E = energia elétrica disponível (MWh/dia);

P = potência disponível (MW);

F_{carga} = fator de carga na geração (%)

Tempo de operação motor = (h/dia)

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.7. Potenciais disponíveis a partir da gaseificação dos resíduos após processo de triagem para os municípios que compõem o Vale do Ribeira

Município	População	RSU Gerado	% de coleta de RSU	RSU coletado	Quantidade de Material Reciclável	Energia de Entrada - Ee = (Vresíduo) x (PCIresíduo)	Vazão do gás de síntese - Q= (Ee) / (PCIsgas)
	hab	t/ano	%	t/ano	t/ano	kcal/h	Nm³/h
Apiaí	24.081	4.475	100	4.475	1.427	274.957	237
Barra do Chapéu	5.794	434	100	434	139	26.688	23
Barra do Turvo	7.606	799	100	799	255	49.116	42
Cajati	28.441	5.318	100	5.318	1.696	326.764	282
Cananeia	12.542	2.734	100	2.734	872	167.980	145
Eldorado	15.592	1.953	100	1.953	623	119.985	103
Iguape	31.117	7.745	100	7.745	2.471	475.905	410
Ilha Comprida	11.552	2.902	100	2.902	926	178.296	154
Iporanga	4.180	599	100	599	191	36.781	32
Itaóca	3.332	464	100	464	148	28.483	25
Itapirapuã Paulista	4.294	533	100	533	170	32.744	28
Itariri	17.754	2.873	100	2.873	916	176.502	152
Jacupiranga	17.911	2.489	100	2.489	794	152.953	132
Juqueia	18.627	3.015	100	3.015	962	185.249	160
Jucutiba	31.844	6.256	100	6.256	1.996	384.402	331
Miracatu	19.511	2.581	100	2.581	823	158.560	137
Pariquera Açu	19.797	3.460	100	3.460	1.104	212.610	183
Pedro de Toledo	11.507	2.011	100	2.011	642	123.574	107
Peruíbe	69.697	19.922	100	19.922	6.355	1.224.076	1.055
Registro	56.463	14.618	100	14.618	4.663	898.209	774
Ribeira	3.320	314	100	314	100	19.287	17
Ribeirão Branco	15.984	2.106	100	2.106	672	129.405	112
São Lourenço da Serra	16.127	3.716	100	3.716	1.185	228.309	197
Sete Barras	12.731	1.807	100	1.807	576	111.015	96
Tapirai	7.725	1.420	100	1.420	453	87.242	75
Total	467.529	94.542	100	94.542	30.159	5.809.090	5.008

Fonte: elaboração o autor

5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme já apresentado anteriormente, a Tabela 5.8 indica o potencial de biogás, biometano e energia elétrica disponível por meio da disposição dos RSU em aterro sanitário nos municípios que compõem o Vale do Ribeira.

Tabela 5.8. Potencial de biogás, biometano e energia disponível por meio da disposição de RSU em aterro sanitário.

Município	Potencial biogás captado (75%)	Potencial de biometano	Potencial de energia elétrica disponível
	Nm ³ /ano	Nm ³ /ano	MWh/ano
Apiaí	439.811	226.707	767
Barra do Chapéu	42.690	22.005	74
Barra do Turvo	78.563	40.497	137
Cajati	522.679	269.422	912
Cananeia	268.694	138.502	469
Eldorado	191.924	98.930	335
Iguape	761.239	392.391	1.328
Ilha Comprida	285.196	147.008	498
Iporanga	58.833	30.326	103
Itaóca	45.560	23.484	79
Itápirapuã Paulista	52.376	26.998	91
Itariri	282.326	145.529	493
Jacupiranga	244.658	126.113	427
Juquia	296.317	152.740	517
Jequitiba	614.875	316.946	1.073
Miracatu	253.627	130.736	443
Pariguera Açu	340.082	175.300	593
Pedro de Toledo	197.664	101.889	345
Peruíbe	1.957.985	1.009.271	4.099
Registro	1.436.741	740.588	2.507
Ribeira	30.851	15.903	54
Ribeirão Branco	206.991	106.696	361
São Lourenço da Serra	365.194	188.244	637
Sete Barras	177.575	91.533	310
Tapirai	139.549	71.932	243
Total	9.291.999	4.789.690	16.895

Fonte: elaboração o autor

O potencial de geração em todos os municípios analisados é considerado baixo, quando comparado ao potencial disponível nas grandes cidades, porém qualquer quantidade de geração de energia é muito importante para nossa matriz energética.

Considerando os dados levantados e os cálculos realizados, os municípios que compõem o Vale do Ribeira possuem, juntos, um potencial de geração de energia elétrica de 16.895 MWh/ano proveniente da disposição de RSU em aterro sanitário, o que poderia abastecer o equivalente a 7.236 residencias durante um ano, considerando o consumo médio residencial de 2.335 kWh em 2020 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021)

Se tratando do potencial total de biometano disponível a partir da disposição de RSU em aterro sanitário na região do estudo, de 4.789.690 Nm³/ano, e considerando o consumo médio de gás natural no setor residencial do estado de São Paulo, de 218 m³/ano em 2020, conforme apontado pelo Governo do estado (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021), seria possível atender 21.938 residências durante um ano.

Considerando o consumo de energia elétrica nos municípios que compõem o Vale do Ribeira foi possível verificar a representatividade do potencial disponível para cada cenário que foi analisado. A tabela 5.9 apresenta o potencial de energia elétrica a partir da disposição dos RSU em aterro sanitário e sua representatividade em relação ao consumo nas residências em cada município analisado neste estudo.

Tabela 5.9. Potencial de energia elétrica disponível a partir da disposição de RSU em aterro sanitário e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município

Município	Potencial de energia elétrica disponível	Consumo de energia elétrica no setor residencial por município	Representatividade (%)
	MWh/ano	MWh/ano	%
Apiaí	767	13.232	6%
Barra do Chapéu	74	2.391	3%
Barra do Turvo	137	3.883	4%
Cajati	912	19.534	5%
Cananeia	469	11.287	4%
Eldorado	335	7.590	4%
Iguape	1.328	24.794	5%
Ilha Comprida	498	20.774	2%
Iporanga	103	2.237	5%
Itaóca	79	1.722	5%
Itapirapuã Paulista	91	1.909	5%
Itariri	493	7.901	6%
Jacupiranga	427	11.112	4%
Juquia	517	11.500	4%
Jequitiba	1.073	26.896	4%
Miracatu	443	12.970	3%
Pariquera Açu	593	13.600	4%
Pedro de Toledo	345	7.500	5%
Peruibe	4.099	87.505	5%
Registro	2.507	47.095	5%
Ribeira	54	2.017	3%
Ribeirão Branco	361	8.175	4%
São Lourenço da Serra	637	11.409	6%
Sete Barras	310	7.698	4%
Tapirai	243	5.122	5%
Total	16.895	369.851	5%

Fonte: elaboração o autor

Conforme já apresentado anteriormente, a Tabela 5.10 indica o potencial de biogás, biometano e energia elétrica disponível por meio da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU nos municípios que compõem o Vale do Ribeira.

Tabela 5.10 Potencial de biogás, biometano e energia elétrica, disponível a partir da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU

Município	Potencial	Potencial de	
	biogás	captado	energia
	(75%)	Nm3/ano	MWh/ano
Apiaí	233.505	132.400	448
Barra do Chapéu	22.665	12.851	43
Barra do Turvo	41.711	23.651	80
Cajati	277.502	157.346	533
Cananeia	142.655	80.887	274
Eldorado	101.897	57.777	196
Iguape	404.159	229.162	776
Ilha Comprida	151.417	85.855	291
Iporanga	31.236	17.711	60
Itaóca	24.189	13.715	46
Itápirapuã Paulista	27.807	15.767	53
Itariri	149.893	84.991	288
Jacupiranga	129.895	73.652	249
Juquia	157.321	89.203	302
Juquitiba	326.450	185.101	627
Miracatu	134.656	76.351	258
Pariquera Açu	180.557	102.378	347
Pedro de Toledo	104.944	59.504	201
Peruibe	1.039.537	589.428	1.995
Registro	762.797	432.514	1.464
Ribeira	16.380	9.287	31
Ribeirão Branco	109.896	62.312	211
São Lourenço da Serra	193.889	109.937	372
Sete Barras	94.278	53.457	181
Tapirai	74.089	42.009	142
Total	4.933.326	2.797.247	9.468

Fonte: elaboração do autor

Neste cenário da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU , os municípios que compõem o Vale do Ribeira possuem, juntos, um potencial de 9.468 MWh/ano, que seria possível atender o consumo anual de 4.055 residencias. Quanto ao potencial disponível de

biometano, de 2.797.247 Nm³/ano, seria possível atender 12.831 residencias durante um ano (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021).

Considerando as mesmas orientações do consumo de energia elétrica nos municípios que compõem o Vale do Ribeira, foi possível analisar a representatividade do potencial para esse cenário.. A tabela 5.11 apresenta o potencial de energia elétrica a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU e sua representatividade em relação ao consumo residencial em cada município analisado neste estudo.

Tabela 5.11: Potencial de energia elétrica disponível a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município

Município	Potencial de energia elétrica disponível	Consumo de Energia Eletrica 2020	Representatividade (%)
	MWh/ano	MWh/ano	%
Apiaí	448	13.232	3%
Barra do Chapéu	43	2.391	2%
Barra do Turvo	80	3.883	2%
Cajati	533	19.534	3%
Cananeia	274	11.287	2%
Eldorado	196	7.590	3%
Iguape	776	24.794	3%
Ilha Comprida	291	20.774	1%
Iporanga	60	2.237	3%
Itaóca	46	1.722	3%
Itapurapuã Paulista	53	1.909	3%
Itariri	288	7.901	4%
Jacupiranga	249	11.112	2%
Juquia	302	11.500	3%
Jequitiba	627	26.896	2%
Miracatu	258	12.970	2%
Pariquera Açu	347	13.600	3%
Pedro de Toledo	201	7.500	3%
Peruíbe	1.995	87.505	2%
Registro	1.464	47.095	3%
Ribeira	31	2.017	2%
Ribeirão Branco	211	8.175	3%
São Lourenço da Serra	372	11.409	3%
Sete Barras	181	7.698	2%
Tapirai	142	5.122	3%
Total	9.468	369.851	3%

Fonte: elaboração do autor

Conforme já apresentado anteriormente, a Tabela 5.12 indica o potencial de energia elétrica disponível por meio do tratamento térmico (gaseificação) dos RSU nos municípios que compõem o Vale do Ribeira.

Tabela 5.12. Potencial de energia elétrica através tecnologia de gaseificação

Município	Potencial de energia elétrica disponível
	MWh/ano
Apiaí	648
Barra do Chapéu	63
Barra do Turvo	116
Cajati	770
Cananeia	396
Eldorado	283
Iguape	1122
Ilha Comprida	420
Iporanga	87
Itaóca	67
Itapirapuã Paulista	77
Itariri	416
Jacupiranga	361
Juquia	437
Juquitiba	906
Miracatu	374
Pariquera Açu	501
Pedro de Toledo	291
Peruibe	2885
Registro	2117
Ribeira	45
Ribeirão Branco	305
São Lourenço da Serra	538
Sete Barras	262
Tapirai	206
Total	13.694

Fonte: elaboração do autor

Adotando o cenário para o tratamento WtE por gaseificação com potencial elétrico de 13.694 MWh/ano, esse montante conseguiria atender um total de 5.864 residências durante um ano.

Para este cenário de gaseificação de resíduos, também foi possível identificar a representatividade da energia disponível em relação à energia consumida nos municípios analisados, conforme apresentado na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 Potencial de energia elétrica disponível a partir da gaseificação de resíduos e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município

Município	Potencial de energia elétrica disponível	Consumo de Energia Eletrica 2020	Representatividade (%)
	MWh/ano	MWh/ano	%
Apiaí	648	13.232	5%
Barra do Chapéu	63	2.391	3%
Barra do Turvo	116	3.883	3%
Cajati	770	19.534	4%
Cananeia	396	11.287	4%
Eldorado	283	7.590	4%
Iguape	1.122	24.794	5%
Ilha Comprida	420	20.774	2%
Iporanga	87	2.237	4%
Itaóca	67	1.722	4%
Itapirapuã Paulista	77	1.909	4%
Itariri	416	7.901	5%
Jacupiranga	361	11.112	3%
Juquia	437	11.500	4%
Juquitiba	906	26.896	3%
Miracatu	374	12.970	3%
Pariquera Açu	501	13.600	4%
Pedro de Toledo	291	7.500	4%
Peruibe	2.885	87.505	3%
Registro	2.117	47.095	4%
Ribeira	45	2.017	2%
Ribeirão Branco	305	8.175	4%
São Lourenço da Serra	538	11.409	5%
Sete Barras	262	7.698	3%
Tapirai	206	5.122	4%
Total	13.694	369.851	4%

Fonte: elaboração do autor

Com os resultados e as soluções aplicadas foi possível simular uma junção entre o potencial de geração da fração orgânica dos RSU e a tecnologia WtE (gaseificação). Esta solução híbrida possui um potencial de geração de 23.162 MWh/ano de energia elétrica, conforme apresentado na Tabela 5.14 Potencial de energia elétrica através tecnologia de gaseificação e fração orgânica dos RSU

Tabela 5.14. Potencial de energia elétrica através tecnologia de gaseificação e fração orgânica dos RSU

Município	Potencial de energia elétrica (WTE)	Potencial de energia elétrica (FORSU)	Potencial de energia elétrica (as Duas Soluções)
	MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano
Apiaí	648	448	1.096
Barra do Chapéu	63	43	106
Barra do Turvo	116	80	196
Cajati	770	533	1.303
Cananeia	396	274	670
Eldorado	283	196	478
Iguape	1.122	776	1.898
Ilha Comprida	420	291	711
Iporanga	87	60	147
Itaóca	67	46	114
Itapirapuã Paulista	77	53	131
Itariri	416	288	704
Jacupiranga	361	249	610
Juquia	437	302	739
Juquitiba	906	627	1.533
Miracatu	374	258	632
Paríquera Açu	501	347	848
Pedro de Toledo	291	201	493
Peruibe	2.885	1.995	4.881
Registro	2.117	1.464	3.581
Ribeira	45	31	77
Ribeirão Branco	305	211	516
São Lourenço da Serra	538	372	910
Sete Barras	262	181	443
Tapirai	206	142	348
Total	13.694	9.468	23.162

Fonte: elaboração do autor

Considerando este cenário híbrido, o potencial de geração de energia elétrica, de 23.162 MWh/ano, poderia suprir o consumo de 9.919 residências. E também nesse caso podemos comparar a representatividade conforme apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 Potencial de energia elétrica disponível a partir da solução híbrida e sua representatividade em relação ao consumo de energia elétrica residencial por município

Município	Potencial de energia elétrica (WTE)	Potencial de energia elétrica (FORSU)	Potencial de energia elétrica (as Duas Soluções)	Consumo de Energia Elétrica 2020	Representatividade (%)
	MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano	MWh/ano	%
Apiaí	648	448	1.096	13.232	8%
Barra do Chapéu	63	43	106	2.391	4%
Barra do Turvo	116	80	196	3.883	5%
Cajati	770	533	1.303	19.534	7%
Cananeia	396	274	670	11.287	6%
Eldorado	283	196	478	7.590	6%
Iguape	1.122	776	1.898	24.794	8%
Ilha Comprida	420	291	711	20.774	3%
Iporanga	87	60	147	2.237	7%
Itáocá	67	46	114	1.722	7%
Itapirapuã Paulista	77	53	131	1.909	7%
Itariri	416	288	704	7.901	9%
Jacupiranga	361	249	610	11.112	5%
Juquia	437	302	739	11.500	6%
Juquitiba	906	627	1.533	26.896	6%
Miracatu	374	258	632	12.970	5%
Pariquera Açu	501	347	848	13.600	6%
Pedro de Toledo	291	201	493	7.500	7%
Peruíbe	2.885	1.995	4.881	87.505	6%
Registro	2.117	1.464	3.581	47.095	8%
Ribeira	45	31	77	2.017	4%
Ribeirão Branco	305	211	516	8.175	6%
São Lourenço da Serra	538	372	910	11.409	8%
Sete Barras	262	181	443	7.698	6%
Tapirai	206	142	348	5.122	7%
Total	13.694	9.468	23.162	369.851	6%

Fonte: elaboração do autor

5.4 ANÁLISE DOS ASPECTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS

Uma das consequências do aumento da população brasileira, é o aumento da demanda energética no país e, para suprir essa necessidade, é importante a busca por alternativas. Outra consequência importante é o aumento significativo da geração de resíduos urbanos, cujo gerenciamento acaba se tornando um grande desafio para os municípios.

Conforme já apresentado neste trabalho, nem todo o RSU gerado no Brasil é coletado e nem todo RSU coletado tem sua disposição adequada.

A disposição inadequada de RSU em aterros controlados e lixões apresenta diversos impactos ambientais e sociais negativos, conforme discutido em diversos outros estudos. Os lixões apresentam grandes impactos negativos como a contaminação de águas subterrâneas, emissões de metano para a atmosfera, além de atrair diversos tipos de animais. Outros problemas associados aos lixões estão relacionados aos riscos de incêndios causados pelo biogás que não é capturado e escorregamentos causados por falta de critérios técnicos (FERREIRA & ROSOLEN, 2012), além de pessoas que residem nesses locais e se alimentam de lixo.

Nesse contexto, considerando a necessidade de eliminar os locais inadequados de disposição de RSU, as tecnologias WtE aparecem como uma ferramenta interessante, principalmente a gaseificação nos pequenos municípios, objeto de estudo deste trabalho.

As tecnologias WtE apresentam algumas vantagens, como a redução da quantidade de RSU a ser descartado, com as correspondentes redução dos impactos locais, visto que apenas os rejeitos (material inerte) devem ser descartados em aterros sanitários, seguindo as diretrizes da PNRS.

Estas tecnologias também podem ser combinadas com um processo de reciclagem e separação da fração orgânica do RSU, para alimentação em biodigestores, conforme apresentado anteriormente.

No estudo de caso apresentado neste trabalho, foi possível averiguar que que as cidades de Apiai, Itapirapuã Paulista, Pedro de Toledo e Ribeira dispõem um total de 7.333 t/ano RSU de forma inadequada, e isso causa um grande prejuízo para a natureza. Essa má gestão dos resíduos pode contaminar o meio ambiente e ainda pode atrair doenças para os moradores da localidade.

Se tratando do município Vale do Ribeira, por exemplo, mesmo que seja uma área de preservação ambiental, seria pertinente a implantação de uma solução WtE. Entretanto, isso seria um grande desafio para o município, pois além de um estudo detalhado local e investimentos nas tecnologias, seria necessário as liberações de órgãos ambientais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o objetivo deste trabalho, foi realizada análise do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no Vale do Ribeira nos diferentes cenários: (i) disposição de RSU em aterro sanitário, (ii) tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU e, (iii) gaseificação dos RSU.

O biogás obtido a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica é um biocombustível totalmente limpo, que pode ser utilizado na geração de energia térmica e energia elétrica podendo ainda ser purificado e transformado em biometano, combustível que permite a substituição e/ou complementação do gás natural.

Esse tipo de aproveitamento vem ganhando espaço cada vez maior e contribuindo com a nossa matriz energética. Outro ponto importante é ressaltar que esse aproveitamento energético do biogás tem impacto direto na redução dos gases de efeito estufa, e esse tipo

de tratamento também colabora com a disposição de RSU de forma mais coerente possível, trazendo mais benefícios para o nosso meio ambiente.

Nos últimos anos a geração de energia através da biomassa traz uma alternativa muito interessante para a renovação da matriz elétrica. Um dos fatores que ocorre é a diversificação de solução de geração de energia. Essa energia gerada a partir da biomassa traz benefícios ambientais, sociais e econômicos importantes, que propiciam a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e, consequentemente, a redução dos níveis de emissões de CO₂. Outra vantagem é que a geração através da biomassa regionaliza a produção de energia, gerando mais receita regional e colaborando com a independência na geração de energia.

No Brasil existe um grande potencial disponível a partir de RSU mas que ainda não é totalmente explorado, seja por ainda não tratarmos nossos resíduos de forma adequada, ou por existirem 2707 lixões em operação, recebendo os nossos resíduos de forma inadequada.

A PNRS, criada há mais de 10 anos, é importante para o nosso país quanto ao direcionamento e tratamento dos RSU. Porém ainda existem grandes desafios para sua implantação, principalmente no que se refere aos aspectos econômicos envolvidos na implementação de novas tecnologias, como é o caso da incineração, por exemplo, visto que ainda não temos em nosso país nenhuma planta até o momento.

No estudo de caso apresentado foram analisados diversos cenários: disposição de RSU em aterro sanitários, biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU e tratamento térmico dos RSU por meio da tecnologia de gaseificação (tecnologia adotada devido ao pequeno porte dos municípios).

O estudo de caso abrangeu uma região territorial longa, mas com pequena população, quando comparada com as grandes cidades. Os resultados encontrados no estudo de caso apontaram uma população de 467.529 habitantes em que gerou um total de 94.542 t/ano de RSU. Se todo esse RSU fosse disposto em aterro sanitário seria possível gerar 16.895 MWh/ano. Se essa mesma quantidade de RSU passasse pelo processo de triagem e a fração orgânica separada fosse encaminhada para o processo de biodigestão anaeróbia, seria possível gerar 9.468 MWh/ano de energia elétrica, que representa 44% a menos de energia, quando comparado ao potencial proveniente de aterro sanitário. Caso os rejeitos obtidos no processo de triagem fossem gaseificados, seria possível gerar 13.694 MWh/ano de energia elétrica, que é 19% menor quando comparado ao potencial proveniente de aterro sanitário. Entretanto, com a solução híbrida (energia proveniente da gaseificação + energia proveniente do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU) seria possível gerar 23.162 MWh/ano de energia elétrica, o que indica que esta seria a melhor alternativa,

considerando todo o resíduo gerado nos municípios analisados, que compõem o Vale do Ribeira. Entretanto, seria necessário uma análise econômica aprofundada para garantir que esta realmente seria a melhor opção.

Foi também realizada uma análise da representatividade do potencial de energia disponível a partir do RSU em relação ao consumo de energia elétrica em cada município analisado. Foi possível identificar que o total de energia elétrica consumida no setor residencial de todos os municípios foi de 369.851 MWh/ano em 2020. A análise da representatividade apontou que a energia disponível a partir da disposição de RSU em aterro sanitário (16.895 MW/ano) representa em média 5% do consumo dos municípios. Para a energia proveniente da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU (9.468 MWh/ano) representa em média de 3% do consumo e, para a energia proveniente da gaseificação dos resíduos (13.694 MWh/ano) representa em média 4% do consumo. Já para a solução híbrida (23.162 MWh/ano), a representatividade foi pouco mais elevada, apresentando em média 6% do consumo total dos municípios, sendo a opção mais atrativa.

Os resultados obtidos no estudo de caso apontaram ainda que o tratamento anaeróbico da fração orgânica dos RSU possibilita a geração de 42% a menos de biometano (2.797.247 Nm³/ano) quando comparado ao produzido em aterro sanitário (4.789.690 Nm³/ano). Para este caso não existe a solução híbrida, pois o biometano só é possível de ser obtido a partir do biogás proveniente da biodigestão anaeróbia da matéria orgânica, o que não ocorre em tecnologias WtE.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GBIO - Grupo de Pesquisa em Bioenergia/IEE - Instituto de Energia e Ambiente/USP - Universidade de São Paulo (2013). Produto III - Relatório de Atividades. Projeto Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) Comparativa entre Tecnologias de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos. P&D EMAE/ANEEL: 0393-00611. São Paulo, 2013.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa/IEE - Instituto de Energia e Ambiente/USP - Universidade de São Paulo (2006). Projeto Gaseifamaz. Disponível em <http://cenbio.iee.usp.br/projetos/gaseifamaz/gaseifamaz.htm>. Acesso em abril de 2019.

ANEEL - Agência nacional de Energia Elétrica (2020). Sistema de Informações de Geração SIGA.Capacidade de Geração do Brasil, 2020. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em março de 2020.

ABIOGAS - Associação Brasileira de Biogás e Biometano (2018). Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB - Versão 2. Associação Brasileira de Biogás e Biometano.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Classificação de Resíduos Sólidos - Norma ABNT NBR 10.004:2004. Rio de Janeiro, maio de 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. Disponível em <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em setembro de 2020.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2018). Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2017/Cetesb; coordenação e redação Maria Heloísa P. L. Assumpção; equipe técnica Marilda de Souza Soares ... [et al.]; colaborador Fernando Antônio Wolmer. Série Relatórios / Secretaria de do Estado do Meio Ambiente, ISSN 0103-4103. São Paulo: CETESB, 2018.

CETESB-Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2017).disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/08/01/aterros-sanitarios-aterros-controlados-e-lixoes-entenda-o-destino-do-lixo-no-parana/> (ACESSO EM 10/10/2021)

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2019). Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2018/Cetesb; coordenação e redação Maria Heloísa P. L. Assumpção; equipe técnica Marilda de Souza Soares ... [et al.]; colaborador Fernando Antônio Wolmer. Série Relatórios / Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, ISSN 0103-4103. São Paulo: CETESB, 2019.

COELHO, S. T. (Coord.); GARCILASSO, V. P., FERRAZ JUNIOR, A. D. N.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. (2018). Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. ISBN: 978-85-86923-53-1. São Paulo: IEE-USP, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Classificação de Resíduos Sólidos. Norma ABNT NBR 10.004:2004. Rio de Janeiro, maio de 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. São Paulo, dezembro de 2020.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M.; ESCOBAR, J. F.; PERECIN, D.; SOUZA, D. B. Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo. [Recurso eletrônico]. ISBN 978-65-88109-06-9 . 250p. São Paulo: IEE--USP, 2020. [online] http://qbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/Atlas_Bioenergia_SP_2020_livro_DIGITAL_FinalV2.pdf. Acesso em agosto de 2021.

Coelho, S. T. (coord.), Garcilasso, V. P., Ferraz Junior, A. D. N., Santos, M. M. dos, Joppert, C. L., 2018. Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. São Paulo: Editora IEE - Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo. ISBN: 978-85-86923-53-1. São Paulo: IEE-USP. [online] www.iee.usp.br/qbio. Acesso em novembro de 2019.

FERREIRA, D. A.; ROSOLEN, V. (2012). Disposição de resíduos sólidos e qualidade dos recursos hídricos no município de Uberlândia/MG. Horizonte Científico (Uberlândia), v. VI, p. 1-21, 2012.

ANEEL - Agência nacional de Energia Elétrica (2020). Sistema de Informações de Geração - SIGA. Capacidade de Geração do Brasil, 2020. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em Agosto de 2020.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2020 Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2019 : Ano base 2019 : Ano base 2019, 2020. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em ago/20120.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRA DO TURVO. Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, 2015. Prefeitura Municipal de Barra do Turvo/Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Disponível em <http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/cpla/2017/05/barra-do-turvo.pdf>. Acesso outubro de 2021.

INSTITUTO JOGUE LIMPO. Logística reversa de lubrificantes – Histórico, 2021. Disponível em <https://www.joguelimpo.org.br/institucional/historico.php>. Acesso em novembro de 2021

DIÁRIO DO RIO.COM. Jardim Gramacho: a Bangladesh que se esconde no Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <https://diariodorio.com/jardim-gramacho-a-bangladesh-que-se-esconde-no-rio-de-janeiro/>. Acesso em novembro de 2021

GRUPO MARQUISE: USINA DE BIOMETANO JÁ PLANEJA AMPLIAR PRODUÇÃO EM 2019

Disponível em <https://grupomarquise.com.br/noticia/usina-de-biometano-ja-planeja-ampliar-producao-em-2019> acessado 11/10/2021

CICLOVIVO PORUMMUNDOMELHOR: Fortaleza inaugura maior usina de produção de biogás com lixo de aterro. Disponível em <https://ciclovivo.com.br/planeta/desenvolvimento/fortaleza-inaugura-maior-usina-produzir-biogas-com-lixo-de-aterro/>. Acesso em outubro de 2021

PENSAMENTO VERDE: Furnas vai gerar energia a partir de resíduos sólidos sem incineração; Disponível em <https://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/furnas-vai-gerar-energia-partir-de-residuos-solidos-sem-incineracao/>. Acesso em outubro 2021

SINTONIZE INFORMAÇÃO ENTRETENIMENTO NEGOCIOS: Solução Energética A Partir Do Lixo É Tema De “Dia De Campo” Em Boa Esperança Disponível em <https://www.sintonize aqui.com.br/noticias/solucao-energetica-a-partir-do-lixo-e-tema-de-dia-de-campo-em-boa-esperanca/>. Acesso em novembro 2021

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOA ESPERANÇA: COMEÇAM AS OBRAS DA PRIMEIRA USINA TERMOQUÍMICA BRASILEIRA. Disponível em <https://www.boaesperanca.mg.gov.br/detalhe-da-materia/info/comecam-as-obras-da-primeira-usina-termoquimica-brasileira/16812/> acesso em outubro de 2021

GOVERNO BRASIL Programa Lixão Zero reduziu em 17% a quantidade de lixões em 2020

DISPONIVEL EM [\(ACESSO EM 10/10/2021\)](https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/02/programa-lixao-zero-reduziu-em-17-a-quantidade-de-lixoes-em-2020)

AMARAL, C. Z.; GIRARDI, J. C.; GUARDEZI, J. S. Proposta de aterro consorciado entre três cidades da Bacia do Paraná 3 para obtenção de biogás. In: 8º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. Curitiba, 2017. Disponível em: file:///C:/Users/geral/Downloads/344-Texto%20do%20artigo-1713-1-10-20170618.pdf

Acesso em setembro de 2021

VGRESIDUOS; Como funciona o aterro sanitário?<https://www.vgresiduos.com.br/blog/como-funciona-o-aterro-sanitario/> (ACESSO EM 10/10/2021)

Abetre—Associação Brasileira de Empresas de Tratamento: disponível em <https://atlas.abetre.org.br/public/atlas> (ACESSO EM 10/10/2021)

EMBRAPA EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA; Compostagem de resíduos orgânicos para uso na agricultura DISPONIVEL EM <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/129/compostagem-de-residuos-organicos-para-uso-na-agricultura> data (10/10/2021)

WP UFPEL Política Nacional de Resíduos Sólidos na prática DISPONIVEL EM<https://wp.ufpel.edu.br/empauta/politica-nacional-de-residuos-solidos-na-pratica/>(ACESSO EM 10/10/21)

ABEGAS.ORG.BR A A Gás Verde, empresa dos grupos Arcadis e J.Malucelli, inaugura oficialmente em 4 de julho duas operações de biogás no Rio, nos aterros de Seropédica e de Nova Iguaçu,2019 DISPONIVEL EM <https://www.abegas.org.br/arquivos/73011> acessado em novembro de 2021)

ENERGIA E BIOGAS <https://energiaebiogas.com.br/fundamentos-do-processo-de-digestao-anaerobia> DATA 10/10/2021)

O GLOBO RIO.COM Paes anuncia que aterro de Gramacho será fechado no dia 23 DIPONIVEL EM <https://oglobo.globo.com/rio/paes-anuncia-que-aterro-de-gramacho-sera-fechado-no-dia-23-4609092>
acessado 11/1grama0/2021

FERREIRA, L. R. A. et al. (2018). Review of the Energy Potential of the Residual Biomass for the Distributed Generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 94, p. 440–455, 2018.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Module 5 – Waste / Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data, and Chapter 3: Solid Waste Disposal, 2006. Disponível em <http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acesso em maio de 2019