

**PEDRO RAPHAEL DE SOUZA PEDROSO BENTO**

**AVALIAÇÃO DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO  
DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

**São Paulo  
2023**

**PEDRO RAPHAEL DE SOUZA PEDROSO BENTO**

**AVALIAÇÃO DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO  
DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

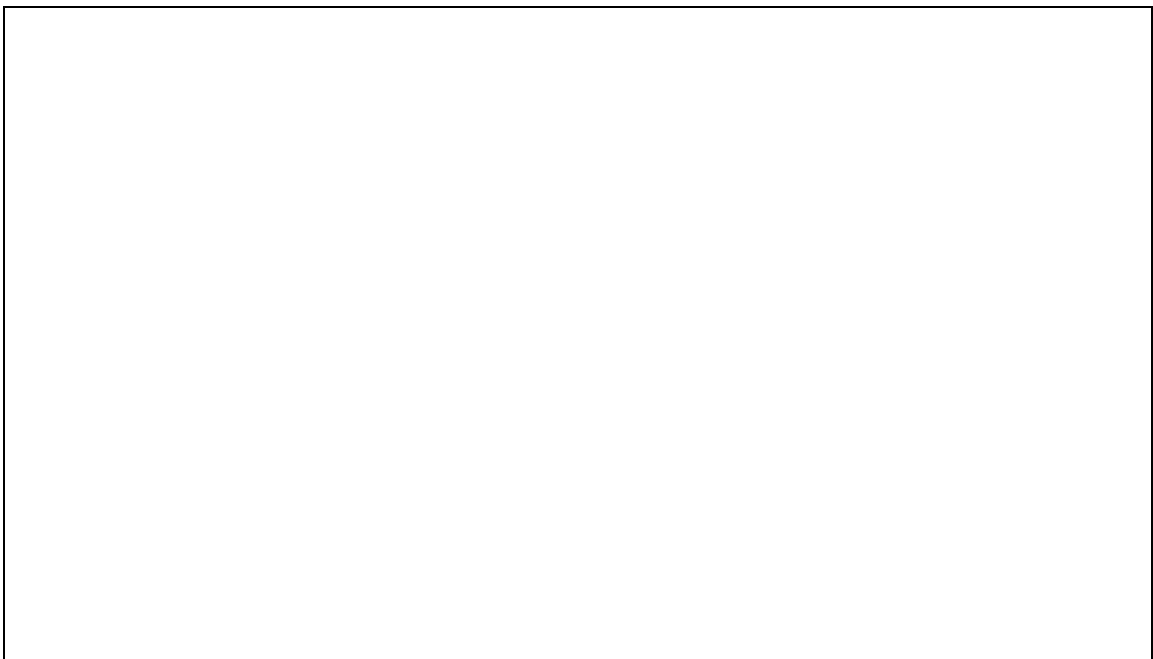
Monografia Apresentada ao PECE  
– Programa de Educação  
Continuada em Engenharia da  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo como parte dos  
requisitos para conclusão do curso  
de Especialização em Energias  
Renováveis, Geração Distribuída e  
Eficiência Energética.

**Área de Concentração: Energia e biomassa**

**Orientadora: Profa. Dra.  
Suani Teixeira Coelho**

**São Paulo  
2023**

## FICHA CATALOGRÁFICA

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is intended for a catalog card.

## **LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS**

ABCON – Associação e sindicato nacional das concessionárias privadas de serviços públicos de água e esgoto

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas

ABRELPE – Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais

APS – Announced pledges scenerio

BEN – Balanço energético nacional

Cal – Caloria

CETESB – Companhia ambiental do estado de São Paulo

CONAMA – Conselho nacional de meio ambiente

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DDA – Doenças dirreicas agudas

DQO – Demanda química de oxigênio

EMBRAPA - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária

EPE – Empresa de pesquisa energética

ETA – Estação de tratamento de água

ETE – Estação de tratamento de esgoto

FIT – Ficha de informação toxicológica

GEE – Gases do efeito estufa

IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística

IEA – International Energy Agency

IPEA – Instituto de pesquisa econômica aplicada

l / s – Vazão – litros por segundo

m<sup>3</sup> / h–Vazão – metros cúbicos por hora

NZE – Net zero emissions by 2050 scnerio

OIE – Oferta interna de energia

OMS – Organização mundial da saúde

PIB – Produto interno bruto

PLANARES – Plano nacional de resíduos sólidos

PLANSAB – Plano nacional de saneamento básico

RAFA – Reator anaeróbio de fluxo ascendente

RSB – Resíduo de saneamento básico

RSU – Resíduo sólido urbano

SIH – Sistema de informações hospitalares

SIN – Sistema Interligado Nacional

SNIS – Sistema nacional de informações de saneamento

STEPS – Stated policies scnerio

t – tonelada

tep – toneleda equivalente de petróleo

UASB – Upflow anaerobic sludge blanket

UNICEF - Fundo das nações unidas para a infância

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Repartição da Oferta Interna de Energia – OIE – 2022. BEN – Relatório Síntese 2023 .....	12
Figura 2 – Participação de energias renováveis na OIE. BEN – Relatório Síntese 2023, IEA, 2021.....	13
Figura 3 – Fornecimento total de energia por combustível e emissões de CO2 para cenários distintos.....	14
Figura 4 – Alterações nas fontes de energia globais por região e tipo de fonte de energia para diferentes cenários .....	15
Figura 5 – Consumo de energia nacional em 2022. BEN – Relatório Síntese 2023 .....	17
Figura 6 – Taxa de internação por doenças diarreicas agudas (DAAs) e outras gastroenterites entre menores de cinco anos (por mil habitantes). Fonte: Painel Plansab, Sistema de informações hospitalares (SIH) do Ministério da Saúde e IBGE.....	21
Figura 7 – Panorama nacional sobre índice de atendimento de água e esgoto por estado e por região. Fonte KPMG e ABCON, 2020 . .....	26
Figura 8 – Saneamento básico e mortalidade infantil. Fonte UNICEF e OMS, 2021. ....	27
Figura 9 – Crescimento do consumo de energia dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário. ....	31
Figura 10 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) 2022. Fonte Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, 2022. ....	33
Figura 11 – Disposição e tratamento aos RSU de 2011 a 2017 para países selecionados. Fonte Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2020..	34
Figura 12 – Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU (%). Fonte PLANARES, 2022. ....	36
Figura 13 – Diagrama Esquemático do sistema de lodos ativados para o tratamento de esgotos. Fonte: Poence, Rollemberg, 2019. ....	39
Figura 14 – Reator UASB/RAFA em fibra de vidro. Fonte: SANEFLUX.....	41
Figura 15 - Diagrama Esquemático do para o tratamento de esgotos com reator UASB seguido de um tratamento aeróbio. Fonte: Assis, 2017.....	41

Figura 16 – Poder calorífico inferior de diversas fontes de biomassa, em função da umidade. Fonte Chernicharo et. al, 2015. ....	44
Figura 17 – Forno de leito fluidizado. Fonte: Miranda, 2014. ....	46
Figura 18 – Reator pirolítico. Fonte: Miranda, 2014. ....	47
Figura 19 – Planta de gaseificação da Cabogás. Fonte: Carbogás. ....	54
Figura 20 – Planta de gaseificação de Furnas. Fonte: Carbogás, Furnas. ....	55
Figura 21 – Solução para tratamento de lodo incluindo gaseificador, fornalha e secador. Fonte: Adobe, Vulcan Drying Systems, Carbogas, Componente ....	56
Figura 22 – Localização das ETEs do Vale do Paraíba e do Aterro SEP Ambiental .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Benefícios econômicos da expansão do saneamento básico no país até 2040. Fonte: Trata Brasil: Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil.....	22
Tabela 2 – Crescimento do consumo de energia dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário. Admite-se que não há variação no índice de consumo de energia (0,25 kWh/m <sup>3</sup> ) e uma expansão linear da universalização. Fonte: População, IBGE.....	30
Tabela 3 – Tipos de destinação final – Cenário metas do Planares – Massa de RSU projetada para 2040 – sem materiais recicláveis. Fonte PLANARES, 2022. ....	35
Tabela 4 – Características do lodo desidratado de acordo com diversos autores. Fonte Chernicharo et. al, 2015. ....	43
Tabela 5 – Características e composição típica do gás de síntese gerador pela planta de gaseificação da Carbogas a partir do processamento de RSU. Fonte: Adaptado de Carbogás.....	48
Tabela 6 – Composição média do gás de síntese.....	48
Tabela 7 – Comparação de processos térmicos para lodos de ETEs. Fonte: Chernicharo et. al (2015).....	49
Tabela 8 – Vantagens e desvantagens dos processos térmicos avaliados. Fonte: Chernicharo et. al (2015).....	50
Tabela 9 – Características técnicas da ETE Pararangaba.....	51
Tabela 10 – Características e composição do lodo – Adaptado de Borges et. al (2008).....	52
Tabela 11 – Características técnicas das ETEs Pararangaba, Lavapés, Taubaté-Tremembé e Campos do Jordão.....	56
Tabela 12 – Cenário Atual – Custos de transporte e disposição final de lodo....	58
Tabela 13 – Cenário Proposto – Custos de transporte e disposição final de lodo .....	59
Tabela 145 – Análise de viabilidade econômica.....	62

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Relevância do estudo.....	12
1.2. Objetivos .....	23
1.2.1 Objetivo geral .....	23
1.2.2 Objetivos Específicos.....	23
1.3 Estrutura do Trabalho .....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1 Saneamento no Brasil.....	25
2.2 Tratamento de esgoto sanitário e produção de lodo .....	36
2.3 Processos térmicos.....	45
2.3.1 Combustão.....	45
2.3.2 Pirólise .....	46
2.3.3 Gaseificação .....	47
3. DESENVOLVIMENTO.....	51
3.1 Premissas .....	51
3.1.1 Estação de Tratamento de Esgoto avaliada.....	51
3.1.2 Características do lodo.....	51
3.2 Seleção do processo térmico .....	52
3.3 Análise Técnica e Financeira .....	55
4. CONCLUSÕES.....	64
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	67

## RESUMO

As estações de tratamento de esgoto sanitário representam importante barreira entre o esgoto bruto e os corpos receptores. O tratamento visa conformar o efluente recebido com remoção de sólidos grosseiros e areia e, principalmente, com a redução da carga orgânica. Existem diversos tipos de tratamento que podem ser empregados desde os mais simples como lagoas de estabilização até métodos sofisticados com membranas ultrafiltrantes ou osmose reversa.

Para estações de médio e grande porte uma metodologia bastante empregada é a de lodos ativados com aeração mecânica. O que este e a maioria dos tipos de tratamento tem em comum é a geração de lodo – mix de microorganismos e matéria orgânica digerida que se aglutina e decanta ao longo do processo. Para o adequado funcionamento das estações, o lodo deve ser removido de maneira regular. Tal remoção pode ser realizada por meio de adensadores e sistemas de secagem (filtros prensa ou centrífugas) a fim de reduzir seu volume para que seja encaminhado a aterros sanitários.

O encaminhamento do lodo para aterros gera grande despesa operacional envolvendo os custos de disposição em aterros adequados e seu transporte. O lodo, no entanto, possui carga orgânica cujo aproveitamento energético poderia gerar receita adicional e redução de custo considerável com seu descarte.

O objetivo deste trabalho é avaliar por meio de aspectos técnicos e econômicos alternativas de aproveitamento do potencial energético do lodo de uma estação de tratamento de esgoto com processo de lodos ativados com aeração mecânica.

A análise literária indicou viabilidade técnica no uso da gaseificação para o tratamento térmico do lodo com aproveitamento do gás de síntese para secagem do material. A partir dos dados fornecidos por um dos fabricantes de plantas de gaseificação, avaliou-se a necessidade de complementação energética no processo de secagem. A avaliação financeira do projeto apontou VPL positivo com *pay back* em torno de 02 anos e TIR bastante acima do WACC da empresa, concluindo-se que o investimento é economicamente viável.

Palavras chave: estação de tratamento de esgoto, lodo, gaseificação, pirólise;

## ABSTRACT

Sanitary sewage treatment plants represent an important barrier between raw sewage and receiving bodies. The treatment aims to conform the effluent received by removing coarse solids and sand and, mainly, reducing the organic load. There are several types of treatment that can be used, from the simplest such as stabilization ponds to sophisticated methods with ultrafiltration membranes or reverse osmosis.

For medium and large stations, a widely used methodology is activated sludge with mechanical aeration. What this one and most types of treatment have in common is the generation of sludge – a mix of microorganisms and digested organic matter that clumps together and settles throughout the process. For the stations to function properly, the sludge must be removed regularly. Such removal can be carried out using densifiers and drying systems (filter presses or centrifuges) in order to reduce its volume so that it can be sent to landfills.

Sending sludge to landfills generates large operational expenses involving disposal costs in suitable landfills and transportation. The sludge, however, has an organic load and its energy use could generate additional revenue and considerable cost reduction with its disposal.

The objective of this work is to evaluate, through technical and economic aspects, alternatives for using the energy potential of sludge from a sewage treatment plant with an activated sludge process with mechanical aeration.

The literary analysis indicated technical recommendations for the use of gasification for the thermal treatment of sludge using synthesis gas to dry the material. Based on data provided by one of the gasification plant manufacturers, we verified the need for energy supplementation in the drying process. The financial evaluation of the project showed a positive NPV with a payback of around 2 years and an IRR well above the company's WACC, concluding that the investment is economically viable.

Keywords: sewage treatment plant, sludge, gasification, pyrolysis;



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Relevância do estudo

A matriz energética brasileira, com significativa parcela de fontes renováveis, das quais destacam-se a energia hidrelétrica, solar, eólica e biomassa derivada de cana de açúcar (Balanço Energético Nacional – BEN, 2023), passou por relevantes alterações nos últimos anos. Diversos fatores contribuem para estas mudanças como a disponibilidade de recursos naturais e regime hídrico, o crescimento da população, a atividade econômica, a regulação governamental no uso dos recursos e no valor das tarifas, a demanda da sociedade por energia e seu padrão de consumo, as expectativas e exigências por soluções mais renováveis e com menor impacto ambiental, além, é claro, dos impactos relativos à pandemia de Covid-19.

Segundo Balanço Energético Nacional – BEN, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, em 2022 o Brasil apresentou uma Oferta Interna de Energia de 303,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo. O documento apresenta ainda expressiva presença de fontes renováveis na Matriz Energética Nacional, que correspondem a 47,4% da OIE, como apresenta a Figura 01.

Esta importante marca, destaca o Brasil no cenário mundial e faz refletir sobre o impacto da utilização de energia no meio ambiente.

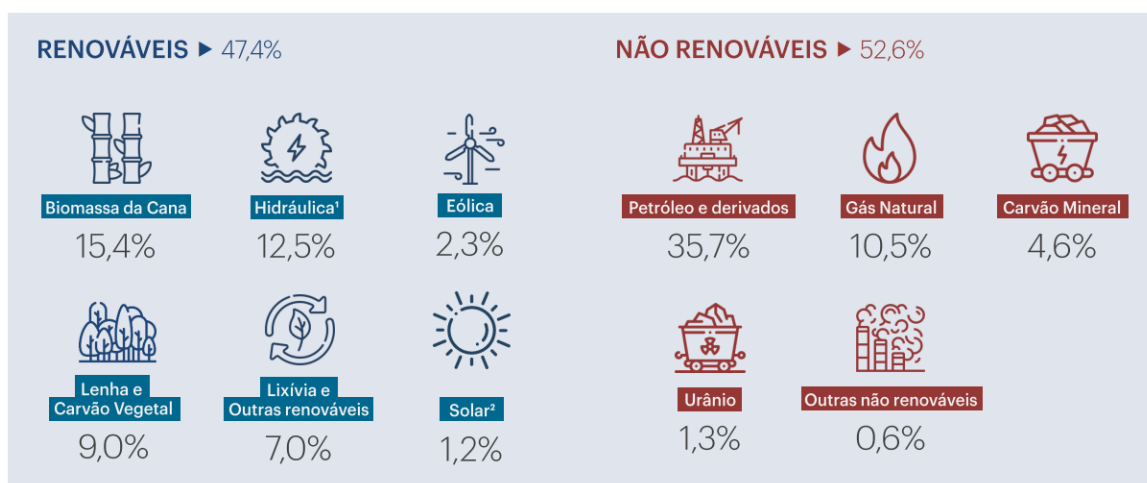


Figura 1– Repartição da Oferta Interna de Energia – OIE – 2022. BEN – Relatório Síntese 2023

Especificamente no caso de 2022, destaca-se o regime hídrico favorável para o ano, que contribuiu para maior oferta de energia de hidráulica. Independente deste fator ocasional, a matriz brasileira supera com expressiva vantagem a matriz mundial, quando falamos em geração de energia a partir de fontes renováveis. Na última década, a participação de renováveis na matriz brasileira cresceu sete pontos percentuais. Enquanto o Brasil se aproxima dos 50% de renováveis, no mundo o carvão mineral, petróleo e derivados e o gás natural aparecem como as principais fontes de energia. Segundo dados de 2020 da International Energy Agency – IEA, a participação de renováveis no mundo, na oferta de energia, estava em 14,1%. A Figura 02 apresenta este contraste e a evolução brasileira no tema.

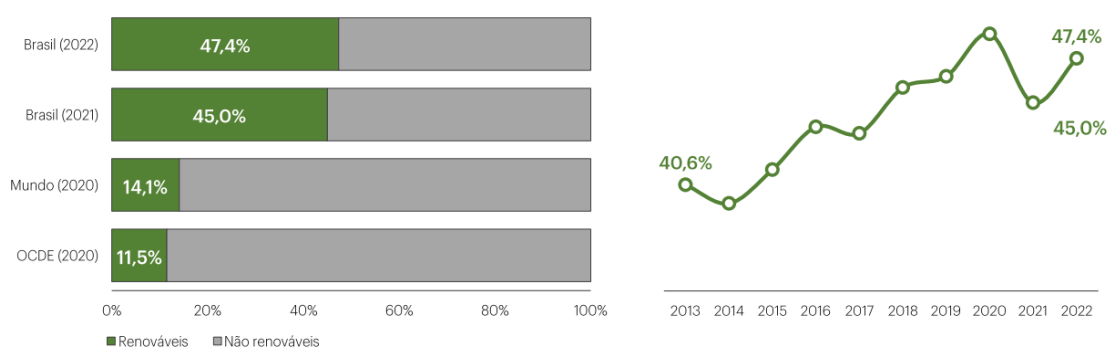


Figura 2 – Participação de energias renováveis na OIE. BEN – Relatório Síntese 2023, IEA, 2021.

Enquanto no Brasil, os combustíveis não renováveis que apresentaram redução foram principalmente petróleo e derivados, gás natural e carvão mineral e coque (BEN, 2023), a IEA aponta uma perspectiva mundial de transição bem mais longa. A Figura 03 mostra a evolução no uso das diferentes fontes de energia pelo mundo em 2021, 2030 e 2050 considerando-se três cenários distintos e os correlaciona com as emissões de gás carbônico (World Energy Outlook 2022, IEA).

Os cenários avaliados são:

- a) STEPS - Stated Policies Scenario – Cenário das política estabelecidas, em tradução livre, ou seja, o status quo. Este cenário apresenta a trajetória do cenário atual no tempo considerando as políticas atuais.
- b) APS – Announced Pledges Scenario – Cenário mostra trajetória prevista

assumindo que todas as políticas ambiciosas ou não, apresentadas pelos governos serão cumpridas no prazo anunciado incluindo objetivos de longo prazo de emissões líquidas zero e de expansão do acesso de energia à população mundial.

- c) NZE - Net Zero Emissions by 2050 Scenario – Cenário de emissões zero em 2050 – este cenário traça uma forma de se alcançar até 2030 a estabilidade de elevação da temperatura global em 1,5°C e a universalização do acesso à energia moderna (considerado energia elétrica e cocção adequada) a toda a população mundial.

Cada um dos cenários propostos requer iniciativas diferentes por parte dos governos e exige uma proporção distinta das fontes de energias renováveis, uma vez que a substituição dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial é uma das principais ações propostas na análise da IEA para a redução das emissões de gases de efeito estufa – GEEs.

Cabe ressaltar, no entanto, que a geração de energia a partir da queima de combustíveis de origem fóssil não é a única origem de GEEs. Estes gases também são produzidos por outras atividades, econômicas ou não, sem relação direta com a produção de energia como a agropecuária, aterros e lixões, desmatamentos e queimadas, plantações inundadas, mineração, uso de fertilizantes à base de nitrogênio (CETESB)

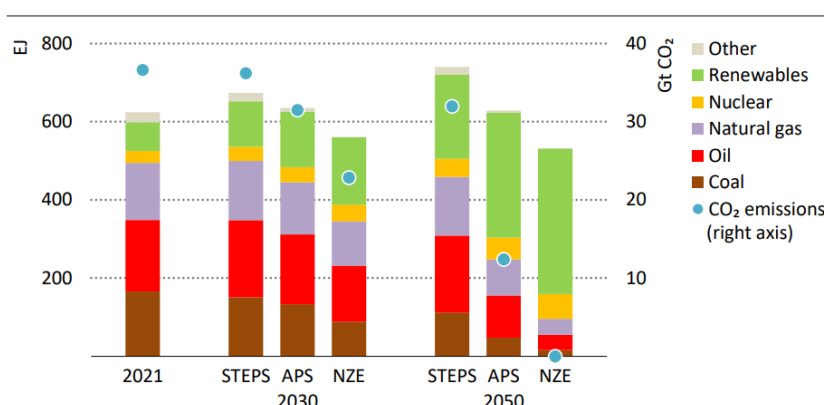


Figura 3 – Fornecimento total de energia por combustível e emissões de CO2 para cenários distintos

Segundo a agência, considerando que os países membros do G7 cumprissem todas as promessas realizadas para atingir descarbonização total de sua

economia em 2035 (cenário APS), o mundo atingiria apenas em 2050 o ponto em que metade de toda energia é gerada a partir de fontes renováveis. Para este cenário fosse atingido a taxa de crescimento da oferta de energias renováveis teria de superar o crescimento da demanda global de energia. Energia eólica e solar fotovoltaica teriam de manter o crescimento acelerado que vem imprimindo e ainda ser complementadas por projetos de energia hidrelétrica, biomassa e geotérmica além de exigir expressivo crescimento (250%) na utilização de biocombustíveis (World Energy Outlook 2022, IEA).

Uma perspectiva mais detalhada por região do mundo e tipo de combustível é apresentada na Figura 04. O gráfico mostra a necessidade imediata, para que se alcance os cenários mais sustentáveis analisados, da redução do uso de carvão mineral, petróleo e gás natural pela economia chinesa, a redução no emprego de gás natural pela economia norte-americana e destaca a necessidade do aumento de fontes renováveis em todo o mundo, mas principalmente na China, Estados Unidos e outras economias em desenvolvimento.

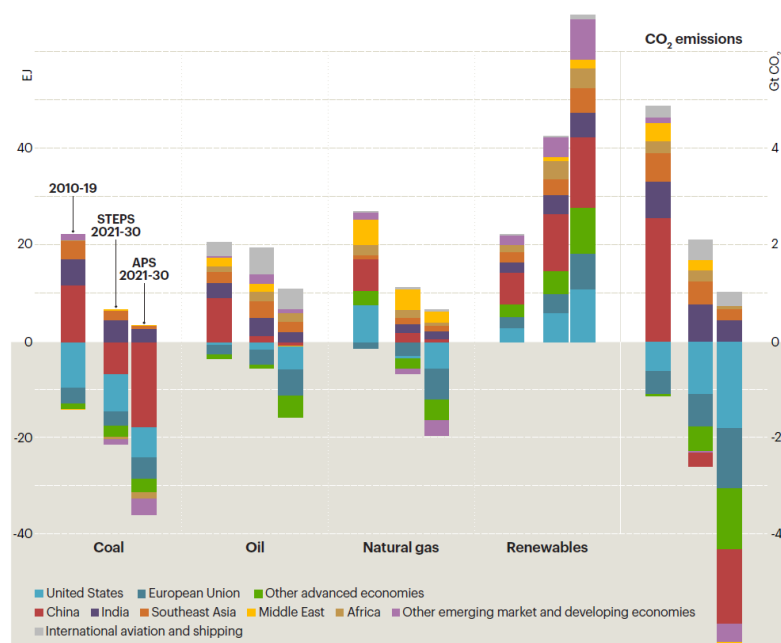


Figura 4 – Alterações nas fontes de energia globais por região e tipo de fonte de energia para diferentes cenários

A forma como pensamos e consumimos energia está intimamente relacionada à forma como vivemos e interagimos com o mundo a nossa volta. Uma sociedade cuja população cresce e se desenvolve, tendo acesso a mais bens de consumo, demandará mais energia para produção destes bens, para sua alimentação e

transporte, para entretenimento. É relevante, portanto, observar as mudanças pelas quais passa a população e a sociedade e seus hábitos de consumo no que se refere à utilização de energia elétricas.

Neste país, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, a população brasileira cresceu 6,5% entre 2010 e 2022, chegando a 203,1 milhões de pessoas. Apesar de expressiva, a população brasileira apresentou menor taxa de crescimento desde a primeira execução do censo, em 1872, o que indica a desaceleração no crescimento populacional, fator observado na redução das famílias brasileiras e envelhecimento da população; ademais, a média anual de crescimento do Brasil vem reduzindo desde a década de 60 (IBGE, 2022).

Mas o crescimento populacional não é o único fator preponderante para o consumo de energia. A renda e, portanto, o acesso das famílias ao consumo em geral e a saúde da economia do país, também figuram como critérios chave no consumo de energia elétrica. O apetite das famílias em consumir não só significa um número maior de bens e eletrodomésticos funcionando em suas casas, como também puxa a produção da indústria – um dos principais consumidores de energia. Neste caso, observa-se que, apesar da alta de 6,9% no rendimento médio per capita do brasileiro em 2022, frente a 2021, o índice apresentou pouca evolução na última década. Mesmo assim, os números da Empresa de Pesquisa Energética – EPE mostram evolução significativa no consumo de energia elétrica nas residências brasileiras no período. Entre 2013 e 2022 o consumo de energia elétrica residencial no país cresceu 22% (EPE, 2023).

Analisando o consumo de energia pelo país de maneira mais abrangente, os principais setores responsáveis pelo consumo de energia são transportes (33,0%) – viário, aéreo e naval considerando cargas e passageiros, indústrias (32,0%), residências (10,7%), setor energético (8,7%), agropecuária (4,8%), serviços (5,0%) e usos não energéticos (5,9)%. Entre 2021 e 2022 o consumo de energia brasileiro cresceu 2,9% passando de 263,8 Mtep para 271,3 Mtep. Valor percentual bastante próximo ao crescimento do Produto Interno Bruto - PIB brasileiro que teve alta de 3,0% indicando a conexão entre a aceleração da atividade econômica de um país e o consumo de energia. Os dados apresentados são evidenciados na Figura 05.

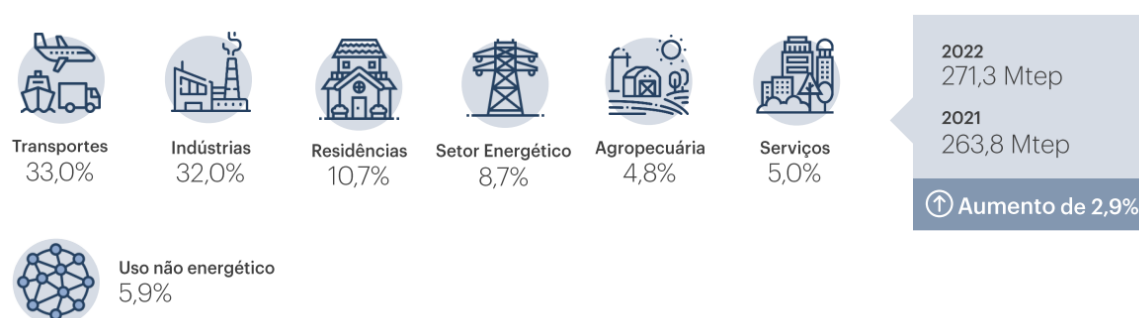


Figura 5 – Consumo de energia nacional em 2022. BEN – Relatório Síntese 2023

Dentre os setores que apresentaram maior alta destacam-se o transportes com crescimento de 5,0%, uso não energético – alta de 15,7% e serviços 6,6%. A elevação na área de transportes e serviços na base 2021/2022 está intimamente ligada à redução das restrições em função do abrandamento da pandemia de Covid-19.

Vale esclarecer que o uso para fins não energéticos, que também demonstrou alta expressiva no período, está relacionado à utilização de combustíveis para a produção industrial e não para geração de energia elétrica. Alguns exemplos são o consumo de petróleo para a produção de asfalto, solventes, lubrificantes e graxas para maquinário e o uso de gás natural para a produção de fertilizantes para o campo (EPE- Planejamento Energético, 2022).

A favorável conjuntura da matriz energética brasileira no que tange a presença de energias renováveis e significativo crescimento do setor no últimos anos fica evidente quando se observa as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa – GEE no país. O Brasil é atualmente o quinto maior emissor de gases de efeito estufa do mundo, ficando atrás apenas de China, Estados Unidos, Índia e Rússia. No entanto, enquanto que nesses países três quartos das emissões está relacionada à queima de combustíveis fósseis, no Brasil praticamente metade das emissões advém das mudanças de uso da terra – com destaque para o desmatamento e mais um quarto está relacionada à agropecuária (Imaflora, 2022).

Para que o Brasil alcance as metas da Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e do Acordo de Paris as principais ações estão relacionadas à redução do desmatamento, aplicação de técnicas de agricultura de baixo carbono e

redução das emissões de metano (CH<sub>4</sub>) (Imaflora, 2022).

As emissões brasileiras de metano tem com principais origens a agropecuária (80%) – em função do maior rebanho bovino do mundo, que emite metano pelos processos de ruminação e eructação – e os aterros e lixões que recebem resíduos urbanos e de estações de tratamento de esgoto (Imaflora, 2022).

Segundo Ficha de Informação Toxicológica da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB sobre o metano

As principais fontes de emissões antropogênicas de metano estão agrupadas em três nichos: a extração, a produção e a distribuição de combustíveis fósseis (gás e carvão), como gás natural e petróleo; as atividades agrícolas e de pecuária e aterros de resíduos urbanos municipais e estações de tratamento de esgotos. (FIT CETESB, 2020).

Os aterros sanitários são a destinação principal para os resíduos sólidos urbanos – RSU e para os resíduos de saneamento básico – RSB em diversos países (YANG et al., 2014 in Borba, Martins Correa, Ritter, 2018).

Segundo (Borba, Martins Correa, Ritter, 2018)

Entre suas características construtivas, um aterro sanitário deve conter estruturas de drenagem e de tratamento de gases e lixiviado, drenagem superficial de águas pluviais, impermeabilização da fundação e camada de cobertura diária, intermediária e final dos resíduos (ABNT, 1984; 1997; 2010).

Quando se utiliza esse tipo de disposição, os resíduos são aterrados e as frações biodegradáveis se decompõem por meio de uma complexa série de reações microbianas e químicas, além de alterações físicas, sendo o resultado final a produção do biogás (SPOKAS et al., 2006). O biogás é constituído basicamente de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e gases traços, tais como diversos compostos orgânicos voláteis não metânicos, que podem ser tóxicos (HRAD et al., 2012). O CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub> são os principais gases indutores do aumento do efeito estufa no planeta (ARONICA et al., 2009).

De acordo com Bogner et al. (2008), a emissão do CH<sub>4</sub> no setor dos resíduos equivale a 18% das emissões antropogênicas de CH<sub>4</sub> em todo o mundo.

Isto posto, verifica-se aqui um ponto de atenção com relação aos resíduos de saneamento básico – RSB. No Brasil, atualmente, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, apenas 51,2% do esgoto é tratado (SNIS, 2021) e, considerando-se a meta nacional de universalização do saneamento, que estabelece que 90% da população seja atendida com tratamento de esgoto até 2033, estabelecido na Lei Federal 14.026 de 2020, para esta década, é razoável esperar um incremento da ordem de 100% (considerando-se o aumento populacional e taxa de cobertura de tratamento de esgoto do período) na destinação de RSBs para aterros sanitários, o que provocará um aumento nas emissões de metano oriundos desta fonte na mesma proporção. É legítima, portanto, a preocupação com o aumento dos RSBs – principalmente o lodo oriundo das estações de tratamento de esgoto – ETEs – subproduto sólido resultante do tratamento do esgoto rico em matéria orgânica, nutrientes e metais pesados (GOMES, 2019). Além disso, esta destinação pode corresponder a até 50% dos custos operacionais de uma planta de tratamento (SPINOSA et al. 2011 in Rosa, Chernicharro, Melo, 2014). Segundo (Rosa, Chernicharro, Melo, 2014):

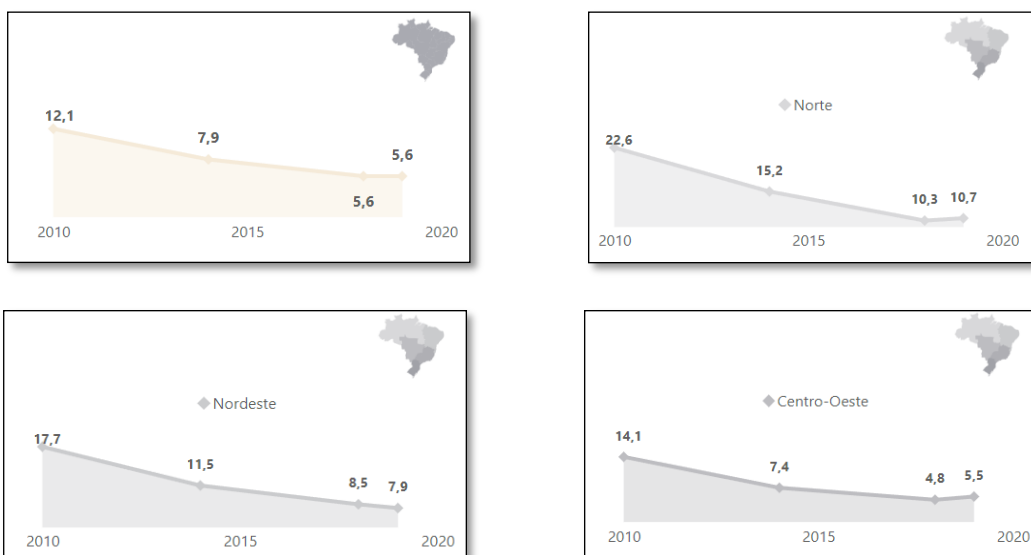
Fernandes et al. (2001) propõem que os estudos de alternativas para gerenciamento e disposição final do lodo devem ser precedidos de estudos das características do esgoto, das tecnologias de tratamento disponíveis, das taxas de produção de lodo, da legislação ambiental e dos tipos de solo e agricultura regional. Apenas após a realização desses estudos é que se deve definir a alternativa de disposição final, devendo esta atender, de forma conjunta, a critérios ambientais, técnicos e econômicos.

Contudo, as decisões relativas ao gerenciamento de lodo muitas vezes não abrangem aspectos ambientais adequadamente e não são avaliadas outras alternativas à destinação deste resíduo (Rosa, Chernicharro, Melo, 2014).

Porém, chama ainda mais atenção a baixa cobertura de tratamento do esgoto sanitário no Brasil, gerando graves impactos à saúde pública e ao meio ambiente. Tal conjuntura mostra-se em oposição a uma matriz energética limpa – o que indica que esta conquista é fruto da abundância e disponibilidade de recursos naturais no país – como rios com capacidade de aproveitamento energético – e

não de uma política de estado centrada na sustentabilidade e redução de emissões ou do cuidado com o meio ambiente. De qualquer forma, a necessidade da expansão da cobertura da coleta e tratamento de esgoto sanitário e o desenvolvimento de soluções para a questão lodo estão profundamente interligadas.

Segundo dados do painel interativo do Plano Nacional de Saneamento Básico – PLAN SAB, no portal do Ministério das Cidades, em todo o país ocorrem anualmente 5,6 internações hospitalares entre os menores de cinco anos de idade para cada mil habitantes por doenças diarreicas agudas – DDAs e outras gastroenterites relacionadas ao saneamento ambiental inadequado. Esta informação totaliza um número de internações da ordem de 1,2 milhões por ano em todo o país. Conforme evidencia a Figura 06 a seguir, apesar de expressiva melhora obtida neste indicador na última década (queda de 12,1 para 5,6) o número ainda é alarmante. Ademais, se observado o resultado por macrorregião, a variação do indicador é bastante relevante, expondo as diferenças sociais e de infraestrutura ao longo do país. Enquanto na região sudeste o número de internações para cada mil habitantes é de 2,7, na região norte o resultado é quatro vezes maior, chegando a 10,7 internações para cada mil habitantes.



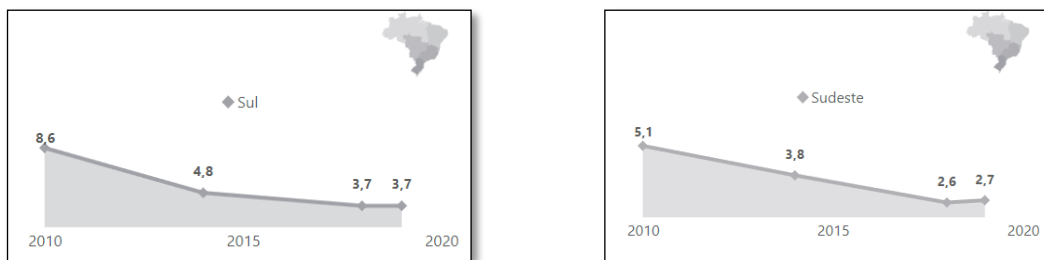


Figura 6 – Taxa de internação por doenças diarreicas agudas (DAAs) e outras gastroenterites entre menores de cinco anos (por mil habitantes). Fonte: Painel Plansab, Sistema de informações hospitalares (SIH) do Ministério da Saúde e IBGE.

Segundo SNIS cerca de 94 milhões de brasileiros continuam sem acesso à coleta de esgoto (SNIS, 2020). Além dos benefícios sociais e à saúde dos brasileiros, estudo realizado pelo Instituto Trata Brasil em parceria com a consultoria econômica Ex Ante, aponta um benefício econômico da ordem de R\$ 815 bilhões com a universalização do saneamento, até 2040 (Trata Brasil, 2022). Este valor advém principalmente do aumento da produtividade do trabalho – externalidade obtida por meio da melhora da saúde pública – além da renda gerada com os investimentos e operação do negócio. A Tabela 01 apresenta os valores estimados para os benefícios e custos da implantação e operação do saneamento entre 2021 e 2040.

Segundo o estudo Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil, elaborado pelo instituto, os ganhos para sociedade brasileira transcendem os social, o econômico e o ambiental, resultando em um impacto transversal para a nação.

A perpetuidade pode ser vista como o ganho de riqueza e de bem-estar que o país terá para todo o sempre com o avanço do saneamento, cujas consequências serão a redução da incidência de doenças, o aumento da produtividade do trabalho, principalmente dos jovens que já nascerão com acesso à água tratada e à coleta e tratamento do esgoto, e a valorização ambiental.

Tabela 1 – Benefícios econômicos da expansão do saneamento básico no país até 2040. Fonte: Trata Brasil: Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil

<b>2021 A 2040</b>		
<b>Custos e benefícios</b>	<b>em R\$ Bilhões*</b>	
	<b>por ano</b>	<b>2021-2040</b>
Redução dos custos com a saúde	1,254	25,079
Aumento da produtividade do trabalho	21,894	437,873
Renda da valorização imobiliária	2,398	47,955
Renda do turismo	3,997	79,945
<b>Subtotal externalidades (A)</b>	<b>29,543</b>	<b>590,852</b>
Renda gerada pelo investimento	27,619	552,385
Renda gerada pelo aumento de operação	13,337	266,747
Impostos ligados à produção**	2,225	44,508
<b>Subtotal de renda (B)</b>	<b>43,182</b>	<b>863,641</b>
<b>Total de benefícios (C=A+B)</b>	<b>72,725</b>	<b>1.454,492</b>
Custo do investimento	-22,766	-455,324
Aumento de despesas das famílias	-9,173	-183,466
<b>Total de custos (D)</b>	<b>-31,939</b>	<b>-638,790</b>
<b>Balanco (E=C+D)</b>	<b>40,785</b>	<b>815,702</b>

(\*) em valores presentes a preços de 2021. (\*\*) dos investimentos e das operações de saneamento e das atividades imobiliárias.

Neste contexto, avaliando-se os dados apresentados e o momento pelo qual passam o Brasil e o mundo, algumas considerações fazem-se pertinentes:

- a) Apesar de a matriz energética brasileira apresentar condição exemplar no que tange às emissões de gases de efeito estufa e conservação do meio ambiente, a condição do saneamento básico do país é precária e desigual;
- b) Cerca de 20% das emissões de GEEs advém do manejo de resíduos, e esta condição é agravada pela destinação massiva do lodo das estações de tratamento de esgoto nos aterros, principal destino para o resíduo no Brasil;
- c) Para melhoria das condições sanitárias no país foram traçadas políticas públicas com metas ousadas que requerem elevados investimentos e trarão grandes benefícios socioeconômicos para a população com prazo relativamente curto;

- d) O aumento da cobertura e coleta de esgoto pelo país agrava a questão da destinação do lodo de ETEs aos aterros sanitários;

A partir de tais considerações, este trabalho visa avaliar alternativas para o gerenciamento de lodo em uma estação de tratamento de esgoto de médio porte localizada na cidade de São José dos Campos que atualmente destina todo o lodo gerado a aterros sanitários por meio da caracterização do lodo gerado, da análise das taxas de produção e legislação ambiental e da localidade da estação, de forma conjunta, com enfoque em processos térmicos para o aproveitamento do potencial energético deste resíduo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar por meio de aspectos técnicos alternativas de aproveitamento do potencial energético do lodo de uma estação de tratamento de esgoto com processo de lodos ativados com aeração mecânica de médio porte avaliando os processos térmicos de combustão, pirólise e gaseificação.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Analisar a literatura disponível sobre o tema a fim de identificar a melhor alternativa de processamento térmico;
- b) Verificar na literatura disponível referências para caracterização do lodo proveniente de uma ETE com processo de tratamento semelhante àquela alvo de análise;
- c) Analisar a viabilidade econômica do aproveitamento térmico do lodo com base em uma estimativa de custo para a solução proposta;

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos sendo estes Introdução, Revisão Bibliográfica, Desenvolvimento, Conclusões e Referência Bibliográfica.

O capítulo introdutório contextualiza o tema, promovendo sua discussão e esclarecendo sua relevância. Neste capítulo também são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho bem como sua estrutura.

O capítulo seguinte traz a revisão bibliográfica dos principais tópicos abordados neste estudo e é dividido em três partes. É construído um panorama do saneamento básico no país e são abordados processos de tratamento de esgoto e também os processos térmicos alvos de análise: combustão, pirólise e gaseificação.

O terceiro capítulo apresenta os detalhes da estação de tratamento de esgoto analisada, os métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho, os dados de caracterização de lodo obtidos na literatura disponível e a discussão acerca da viabilidade da utilização de processos térmicos na planta.

No capítulo 04 são apresentadas as conclusões e sugestões para estudos futuros e no quinto e último capítulo é exposta a referência bibliográfica consultada para construção deste trabalho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Saneamento no Brasil**

Em julho de 2020, foi aprovada a Lei 14.026/2020 que ficou conhecida como Novo Marco Legal do Saneamento. Promovendo maior abertura ao mercado privado, por meio da extinção dos contratos de programa e reforçando a promessa de universalização e maior eficiência no setor, o Marco divide críticos e entusiastas e reforça as esperanças dos investimentos anunciados, quando da criação do Plano Nacional do Saneamento Básico (PLANSAB), em 2012.

Setor fundamental para o desenvolvimento nacional tanto pelo aspecto social, quanto pelo econômico, o Saneamento Básico é um setor de infraestrutura de base, intimamente vinculado à qualidade de vida, à saúde pública e ao meio ambiente. Prevendo investimentos da ordem de R\$ 700 bilhões, a lei reitera a promessa de universalizar o saneamento no Brasil até 2033, quando 99% dos brasileiros deverão ter acesso à água tratada e 90% deverá ter seu esgoto coletado e tratado. Há 10 anos do final do prazo previsto para universalização, o panorama brasileiro segue desafiador. Levantamento realizado pelo consultoria KMPG com dados extraídos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2018), do Instituto Trata Brasil, do PLANSAB e da Bloomberg, apresenta na Figura 07 o abismo entre a realidade do país e as metas pretendidas.

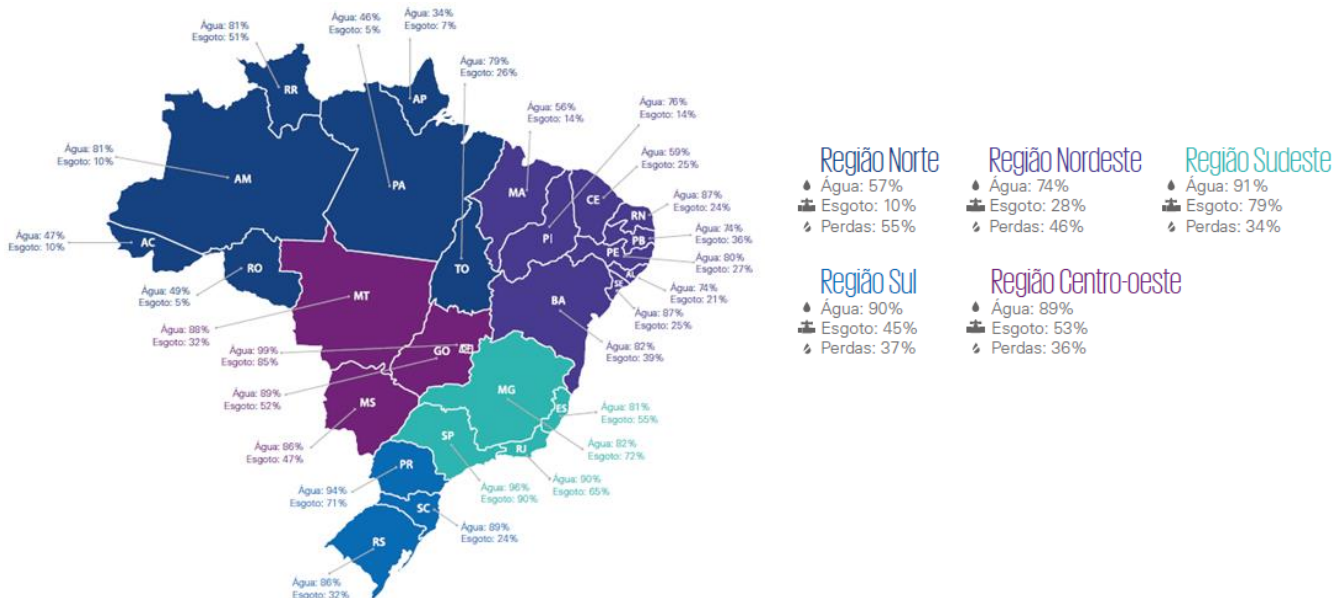
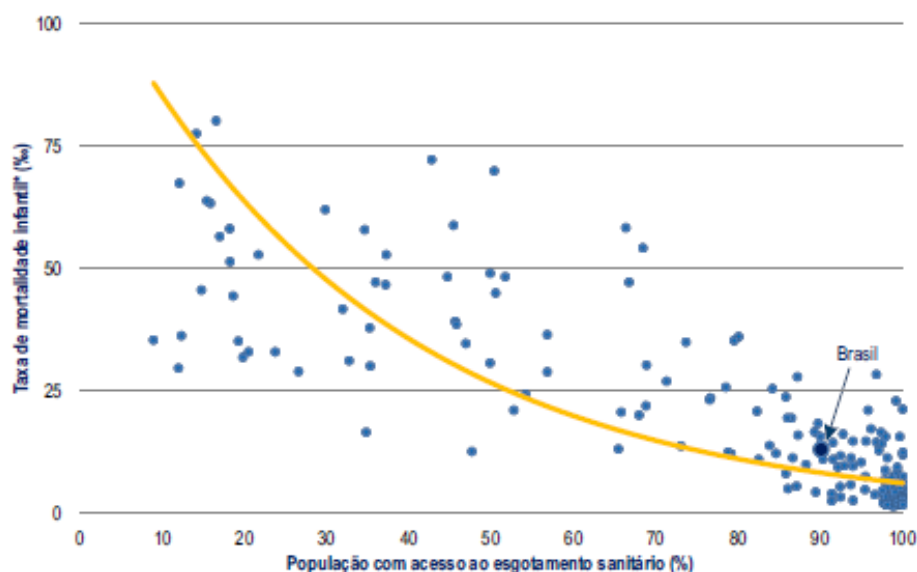


Figura 7 – Panorama nacional sobre índice de atendimento de água e esgoto por estado e por região. Fonte KPMG e ABCON, 2020 .

Como os dados evidenciam, o desafio é enorme, principalmente, quando se faz um recorte da situação do esgoto sanitário. De acordo com SNIS, considerando dados de 2021, apenas 55,8% da população nacional é atendida por sistema de coleta e tratamento de esgoto e apenas 51,2% do esgoto gerado no Brasil é tratado. Para o alcance das metas governamentais, somente em esgoto, devem ser investidos R\$ 22 bilhões anuais até 2033 para universalização dos sistemas. As regiões Norte e Nordeste totalizam 35% da necessidade de aportes nesta mesma área (KPMG e ABCON, 2020).

A importância da ampliação do atendimento de esgoto sanitário é inquestionável. Segundo o DATASUS (2021), o Brasil teve 130 mil internações, quase 360 por dia, por conta de doenças transmitidas pela água.

Em âmbito internacional, um levantamento realizado pelo Fundo das Nações Unidas para a Infância – UNICEF e pela Organização Mundial da Saúde em 2021 correlaciona taxa de mortalidade infantil com acesso ao esgotamento sanitário e constata a elevação acentuada nos índices de mortalidade em locais onde uma baixa porcentagem da população é atendida pelo serviço. A Figura 08 apresenta o referido gráfico.



Fonte: UNICEF e WHO, 2021. [\*] Crianças de até 5 anos de idade falecidas por 1.000 nascidos vivos. Elaboração: Ex Ante Consultoria Econômica.

Figura 8 – Saneamento básico e mortalidade infantil. Fonte UNICEF e OMS, 2021.

O Instituto Trata Brasil foca seu trabalho na análise e divulgação de dados sobre as externalidades do adequado tratamento de água e esgoto. Segundo o Instituto

[...] a falta de saneamento tem implicações imediatas sobre a saúde e a qualidade de vida da população que mora em áreas degradadas do ponto de vista ambiental. A falta de água tratada tem impacto direto sobre a saúde, principalmente dos mais novos e dos mais velhos, pois aumenta a incidência de infecções gastrointestinais. A carência de serviços de coleta e de tratamento de esgoto, mesmo quando há o acesso à água tratada, é responsável por outra parte das infecções gastrointestinais e das doenças transmitidas por mosquitos e animais. Os problemas mais graves surgem nas beiras de rios e córregos contaminados ou em ruas onde passa esgoto a céu aberto – em valas, sarjetas, córregos ou rios. Mas está presente também na poluição dos reservatórios de água e nos mananciais cuja qualidade tem sido deteriorada ao longo dos anos. A exposição ambiental ao esgoto e a falta de água tratada provocam doenças que abalam a saúde de crianças, jovens e adultos (Trata Brasil, 2021).

O órgão ressalta ainda as externalidades positivas do investimento na ampliação do saneamento. Apenas a redução de custos com saúde pública, relativos à ampliação da população atendida pelo tratamento de água e esgoto, é da ordem R\$ 1,25 bi por ano. Outros benefícios apontados são aumento da produtividade

no trabalho, aumento da produtividade escolar, expansão do turismo, renda e impostos gerados pelos investimentos no setor e de sua operação, valorização imobiliária, melhora na qualidade de vida de maneira geral.

Outras questões, porém, ainda são relevantes. A universalização, como se cunhou o termo que se refere a ampliação dos serviços de saneamento, traz, além dos desafios de financiamento, captação de recurso e motivação dos entes, principalmente privados, para que haja investimento no setor, bem como diversos desafios técnicos, dentre os quais destaco:

a) Disponibilidade de energia elétrica para o setor

Segundo Diagnóstico Temático – Serviço de Água e Esgoto publicado em maio de 2022 para o ano de referência de 2020 pelo SNIS em 2020, as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento participantes do SNIS atingiram R\$ 7,37 bilhões (FN013), com consumo de 13,9 TWh, compostos por 12,4 TWh nos sistemas de abastecimento de água (AG028) e 1,5 TWh nos sistemas de esgotamento sanitário (ES028). Segundo Anuário Estatístico da EPE – Empresa de Pesquisa Energética, o Brasil produziu 621 TWh no mesmo ano, ou seja, 2,2% de toda energia gerada no país foi consumida pelos participantes do SNIS naquele ano.

Para maioria das concessionárias de saneamento básico, as despesas com energia elétrica representam a segunda maior despesa da companhia, ficando atrás apenas de folha de pagamento, às vezes sendo ultrapassadas por custos com terceiros. Sobre estas informações vale ainda ressaltar que: a) segundo dados consolidados pelo SNIS em 2021 apenas 84,1% da população total era atendida com água tratada. Os números para esgotamento sanitário, conforme já destacado, são de 55,8%.

O tratamento de esgoto em estações com grandes vazões demanda elevada quantidade de energia elétrica, principalmente no sistema de aeração. Alguns dos principais sistemas que consomem energia em uma estação são:

- i. Estação elevatória de entrada: muitas estações, por ficarem posicionadas em terrenos baixos, favorecendo a condução do esgoto até a estação por gravidade, possuem elevatórias de entrada – normalmente com baixa altura manométrica e grande vazão – para elevar o esgoto até o início do tratamento. Essas bombas funcionam ininterruptamente;
- ii. Tratamento preliminar: sistema normalmente constituído por cagas de pequeno porte que acionam roscas transportadores, grades, sistemas de remoção de areia, peneiras mecanizadas, entre outros.
- iii. Aeração: este é o sistema que consome maior parte da energia em um sistema de tratamento aeróbio. A fim de manter o tratamento na fase aeróbia, o ar (ou oxigênio em alguns casos) é insuflado (normalmente por sopradores, turbocompressores, aeradores, etc.) para os tanques de aeração, onde a matéria orgânica presente no esgoto será digerida por bactérias aeróbias.
- iv. Recirculação: Para as grandes estações que se utilizam dos sistemas de lodos ativados, parte do lodo rejeitado pelo decantadores é devolvido ao processo para reaproveitamento uma vez que é rico em microorganismos desejáveis. As bombas de recirculação também operam ininterruptamente.
- v. Desaguamento: O lodo que não recircula no processo deve ser removido deste. Caso sua destinação seja a disposição em aterros sanitários é obrigatório (e financeiramente interessante) que a concentração de sólidos no lodo atenda à parâmetros mínimos, reduzindo assim a massa total encaminhada ao aterro. Para tal função são utilizados decanters centrífugos, filtros prensa, entre outros sistemas, para a desidratação do lodo.

Em 2019, o índice de consumo de energia em sistemas de esgotos era de 0,25 kWh/m<sup>3</sup> (SNIS 2019), com consumo total de energia de 1,4 TWh. Elaborando-se uma projeção até 2033, considerando-se apenas o aumento populacional e a ampliação desejada pelas metas de

universalização estabelecidas pelo governo, em 2033 o aumento de consumo de energia elétrica seria de 98,5%, chegando ao patamar de 2,78 TWh por ano. A tabela 02 apresenta a projeção. Os dados relativos ao crescimento da população são do IBGE.

Tabela 2 – Crescimento do consumo de energia dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário. Admite-se que não há variação no índice de consumo de energia (0,25 kWh/m<sup>3</sup>) e uma expansão linear da universalização. Fonte: População, IBGE.

Ano	População	Aumento da Cobertura de esgoto	População Atendida	Consumo anual [TWh]	Crescimento
2019	210.147.125	49,10%	103.182.238	1,40	-
2020	211.755.692	50,80%	107.571.892	1,46	4,25%
2021	213.317.639	53,8%	114.797.708	1,56	6,72%
2022	214.828.540	56,8%	122.088.712	1,66	6,35%
2023	216.284.269	59,8%	129.437.816	1,76	6,02%
2024	217.684.462	62,9%	136.839.802	1,86	5,72%
2025	219.029.093	65,9%	144.289.627	1,96	5,44%
2026	220.316.530	68,9%	151.781.142	2,06	5,19%
2027	221.545.234	71,9%	159.308.065	2,16	4,96%
2028	222.713.669	74,9%	166.863.934	2,26	4,74%
2029	223.821.305	77,9%	174.442.882	2,37	4,54%
2030	224.868.462	81,0%	182.039.669	2,47	4,35%
2031	225.854.415	84,0%	189.648.215	2,57	4,18%
2032	226.777.802	87,0%	197.261.799	2,68	4,01%
2033	227.638.581	90,0%	204.874.723	2,78	3,86%
				<b>Total</b>	<b>98,56%</b>
				<b>Médio</b>	<b>4,68%</b>

A Figura 09 representa o crescimento do consumo de energia relacionado à coleta e tratamento de esgoto de forma gráfica, ilustrando os dados da Tabela 02.

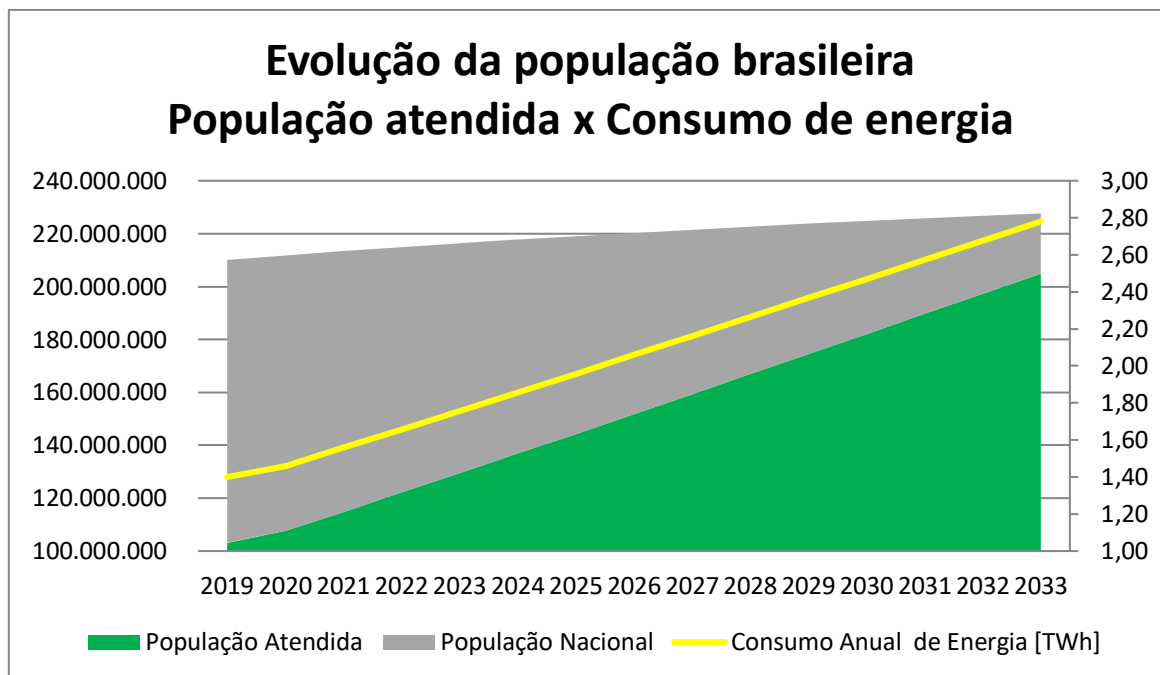


Figura 9 – Crescimento do consumo de energia dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário.

De acordo com Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE em dezembro de 2022, o crescimento médio da carga do Sistema Interligado Nacional – SIN projetado para esta próxima década é de 3,1 %a.a, ou seja, 1,58% pontos percentuais abaixo da projeção para o consumo de energia com esgotamento sanitário.

Estas informações acendem um alerta para um gargalo de infraestrutura de produção (e transmissão) de energia que deve ser destravado para que se garanta os anseios de universalização do governo brasileiro. O que se vê é um setor que deve crescer acima da média projetada pelo EPE e cuja demanda por energia deve dobrar nos próximos 10 anos.

b) Espaço disponível em aterros para o descarte de lodo de tratamento

Outra questão técnica relevante é a ocupação dos aterros sanitários, destino do lodo oriundo do tratamento de diversas estações de tratamento de esgoto.

A resolução Nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA,

de 29 de agosto de 2006 estabelece critérios e metodologias para o uso agrícola dos lodos de esgoto gerado nas ETEs. A resolução aponta ainda que:

a produção de lodos de esgoto é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos e tende a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana e a solução para sua disposição é medida que se impõe com urgência (CONAMA, 2006).

Segundo a resolução, o lodo oriundo de estações que recebem esgotos de processos industriais, hospitalares ou que não respeitam os limites estabelecidos no documento para substâncias orgânicas e inorgânicas tóxicas além de indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos não pode ser aceito para o uso agrícola. Esta é uma realidade para muitas das estações de tratamento, principalmente aquelas de médio e grande porte, localizados em grandes centros urbanos que, além de receber o esgoto doméstico de alguns bairros ou mesmo de uma cidade inteira, acaba recebendo contribuição de indústrias que não tem seu próprio sistema de tratamento e de hospitais em sua área de abrangência. A falta de tratamento adequado para remoção de patógenos, metais pesados e para redução da atratividade de vetores implica no não atendimento aos níveis regulatórios o que enseja na destinação a aterros sanitários do lodo proveniente daquelas estações (CONAMA, 2006).

No Brasil, os aterros são uma saída amplamente utilizada para o lodo proveniente de ETEs apesar de representar elevado custo operacional (Rosa, Chernicharro, Melo, 2014). Eles representam uma forma adequada e segura de disposição que permite monitoramento e evita agressões ao meio ambiente. No Brasil, os aterros também são a destinação mais comum para os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), com cerca de 60% dos resíduos gerados sendo destinados para este fim (MIRANDA, 2014).

A tendência crescente na disposição de lodo em aterros sanitários, pressionada pelo crescimento da população e pelo provável e desejável aumento na população atendida pelos serviços de esgotamento sanitário concorre ainda com outra meta governamental – a migração dos resíduos

hoje destinados a aterros controlados e lixões para os aterros sanitários, tornando este importante recurso de nossa infraestrutura ainda mais escasso. A Figura 10 apresenta o cenário Brasileiro atual com relação a disposição final dos RSU.

[...] lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões dos pais e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas com destinação inadequada (ABRELPE, 2020).

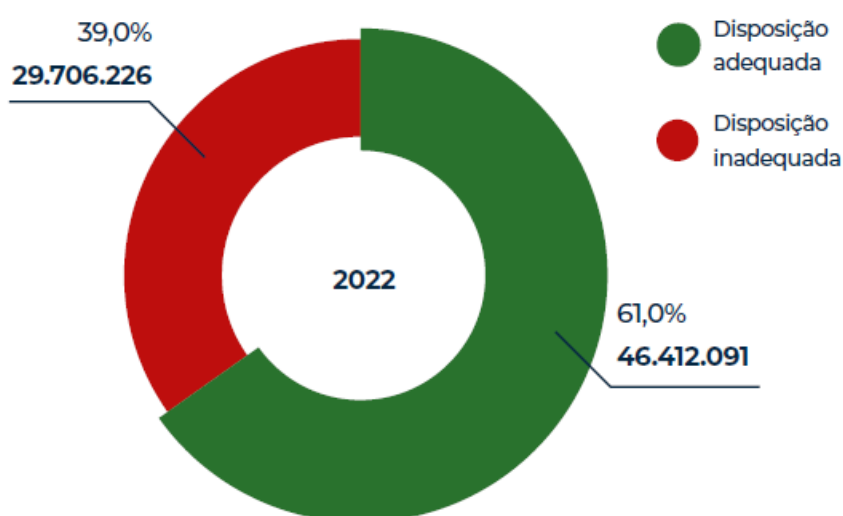


Figura 10 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %) 2022. Fonte Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, 2022.

No Brasil, a disposição em aterros (sanitário e controlado) e lixões, tem sido a principal destinação para os RSU. No entanto, em outros países, visando minimizar o impacto ambiental outros tipos de tratamento vem sendo utilizados. Destacam-se principalmente a reciclagem (também empregada em solo nacional, mas com potencial para ampliação se comparado a outros países), a incineração, a digestão anaeróbia, a compostagem além de outros processos térmicos (KAZA, 2018). A Figura 11 apresenta os tipos de disposição e tratamento dado aos resíduos para alguns países com realidades distintas.

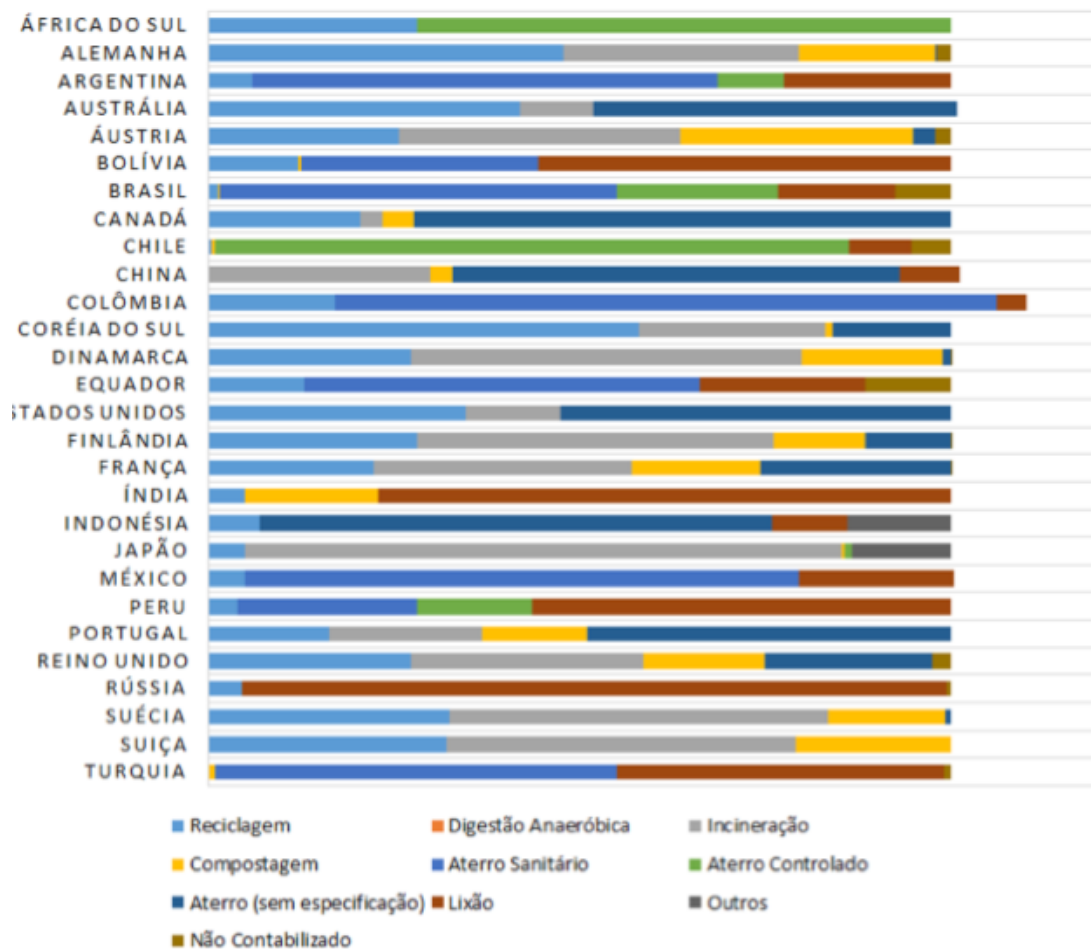


Figura 11 – Disposição e tratamento aos RSU de 2011 a 2017 para países selecionados. Fonte Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2020.

A partir da análise elaborada nas alíneas a) e b) salienta-se a necessidade de desenhar soluções capazes de garantir a disponibilidade de energia para a coleta e tratamento de esgoto além de reduzir o volume de resíduos destinados aos aterros. Neste sentido, destacam-se os processos térmicos que tem potencial para o aproveitamento energético dos resíduos e trazem ainda como benefício uma redução expressiva do volume e massa a serem transportados para os aterros sanitários.

Os processos térmicos, e dentre eles destaca-se a incineração, já vem sendo empregados em países desenvolvidos conforme destaca-se na Figura 11 A incineração é alternativa utilizada de maneira expressiva em países como Alemanha, Áustria, China, Coreia do Sul, e França. Ela é ainda a principal destinação para Dinamarca, Finlândia, Suécia, Suíça e especialmente Japão.

Os processos térmicos empregados para tratamento de RSU também podem ser utilizados para os lodos de ETEs desde que o lodo seja adequado.

No Brasil, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES já faz projeções com emprego de tratamento térmico e aproveitamento térmico dos resíduos em suas metas, conforme apresenta a Tabela 03.

Tabela 3 – Tipos de destinação final – Cenário metas do Planares – Massa de RSU projetada para 2040 – sem materiais recicláveis. Fonte PLANARES, 2022.

<b>Destinação</b>	<b>Massa (t/ano)</b>
<b>Tratamento da fração orgânica</b>	
Tratamento Biológico	14.881.320
<b>Recuperação energética</b>	
Tratamento Térmico (WtE)	16.093.872
<b>Disposição final em aterro sanitário</b>	
Sem aproveitamento energético	22.327.153
Com aproveitamento energético	34.883.254
<b>Total</b>	<b>88.185.600</b>

Estas estimativas foram elaboradas a fim de se atingir quatro metas principais do Planares, conforme destaca ABRELPE, 2022.

- i) Eliminação de lixões e aterros controlados até 2024;
- ii) Recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico;
- iii) Recuperação da fração seca dos recicláveis por processos de reciclagem;
- iv) Recuperação e aproveitamento energético por meio do tratamento térmico.

Estas metas são destacadas ainda de forma temporal na Figura 12, considerando o horizonte 2024 a 2040 (PLANARES, 2022 e ABRELPE, 2022).

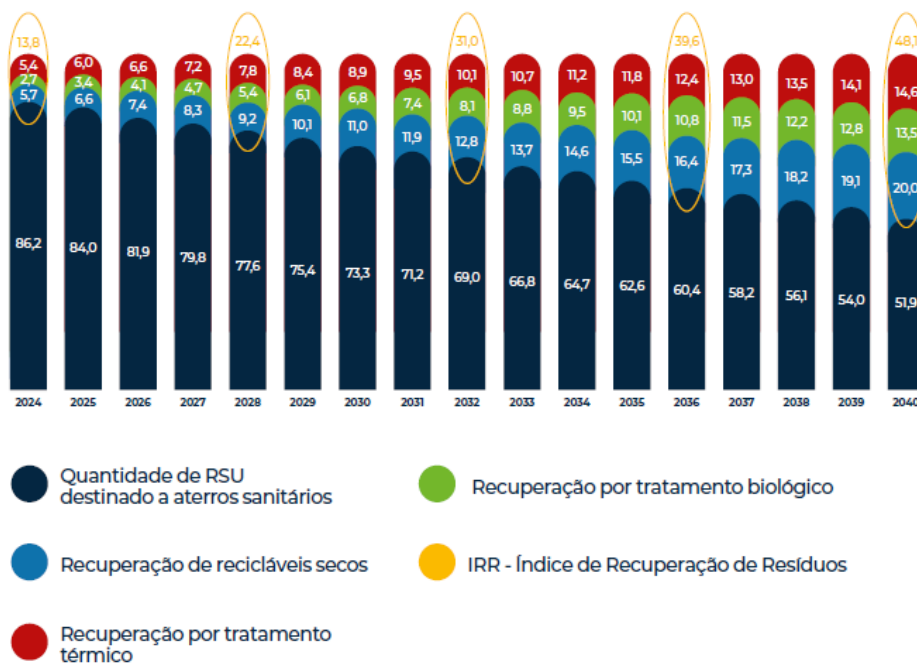


Figura 12 – Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU (%). Fonte PLANARES, 2022.

## 2.2 Tratamento de esgoto sanitário e produção de lodo

Existem diversos métodos que podem ser empregados no tratamento de esgotos e a seleção do método adequado está ligada a diversos aspectos técnicos e financeiros tais como a vazão pretendida, as características do esgoto a ser tratado, a área disponível para a estação, a qualidade desejada para o efluente final, que normalmente está relacionada o corpo receptor, entre outros aspectos operacionais, geográficos e demográficos. É correto afirmar que o esgoto sanitário é nada mais que água com 99,9% de pureza e que, todo o tratamento desenvolvido visa separar desta água 0,1% de sólidos que podem conter, entre outras substâncias, microrganismos patogênicos ou não, metais, matéria orgânica e inorgânica (SPERLING, 2005; CORREIA, 2009 in SILVA, 2011).

Os principais tipos de tratamento dividem-se entre anaeróbios, em que a digestão da matéria orgânica é realizada sem a presença de oxigênio, por microrganismos presentes neste meio e aeróbios, em que a digestão é feita por microrganismos que dependem de oxigênio para sobreviver e digerir a matéria orgânica. Quando o esgoto é encaminhado em sua forma bruta para a natureza a decomposição da matéria orgânica nele presente consome oxigênio do ambiente prejudicando os seres vivos que ali vivem. Além disso o lançamento sem controle de esgotos em

corpos d'água libera em sua decomposição gases de mau cheiro como o sulfeto de hidrogênio, promove o crescimento descontrolado de plantas aquáticas, devido a abundante presença de nutrientes como fósforo e nitrogênio e pode transportar microrganismos patogênicos a estes corpos receptores (Batistella, 2015).

As principais etapas do tratamento de esgotos podem ser divididas em:

a) Tratamento preliminar

Nesta fase são removidos e segregados o material sólido orgânico e inorgânico que não pode ser biodigeridos na estação. Normalmente são utilizados processos mecânicos como gradeamento mecanizado ou não, classificadores e removedores de areia, peneiras e processos físicos como sedimentação ou flotação. (Silva, 2011; Batistella, 2015);

b) Tratamento secundário (biológico)

No tratamento secundário ocorre a decomposição da matéria orgânica por meio da ação dos microrganismos podendo esta ser aeróbia ou anaeróbia. A seleção do tipo de tratamento secundário é decorrente da avaliação da vazão tratada, propriedades do esgoto, área disponível, entre outros. Este processo é realizado por uma gama de bactérias e protozoários cuja presença pode indicar a saúde e tempo de ciclo da matéria orgânica presente no meio. É nesta fase que é gerado o lodo: composto agregado de matéria orgânica digerida e a ser digerida, inorgânica e microrganismos. (PEDROZA et al., 2010; SPERLING 2005);

c) Tratamento terciário

Etapa avançada de tratamento que visa o refino da qualidade do efluente final ou a remoção de algum componente específico. São tratamentos terciários comuns o uso de membranas ultra filtrantes para remoção de material sólido dissolvido, remoção de fósforo por coagulação química, correção de cor por meio da adsorção com carvão ativado, osmose reversa, tratamentos específicos para remoção de fosfatos e nitrogênios, etc (Silva, 2011; Batistella, 2015).

Dentre os processos aeróbios convencionais destaca-se, principalmente para ETEs de médio e grande porte, o processo de lodos ativados com aeração prolongada. As principais vantagens deste processo são a redução significativa na área de implantação da estação, a facilidade de operação, a estabilidade às variações de vazão e carga orgânica e a não geração de odores na estação. Em contrapartida o processo consome elevada quantidade de energia elétrica para a aeração dos reatores biológicos. Em algumas plantas, a fim de otimizar o volume dos reatores, conseguindo resultados adequados de tratabilidade em espaço reduzido, pode ser introduzido no reator oxigênio puro ao invés de ar (SPERLING, 2016; JORDÃO, PESSOA, 2014).

Neste processo, após passar pelo tratamento preliminar para a remoção de sólidos grosseiros e areia, o esgoto é dirigido até um reator biológico (tanque de aeração) onde é fornecido ar ou oxigênio difuso promovendo agitação no tanque, por meio de sopradores, invents, ou ainda aeradores superficiais. É nesta fase que, em meio a apropriada concentração de oxigênio, bactérias, protozoários e outros microrganismos digerem a matéria orgânica presente no esgoto convertendo-a principalmente em gás carbônico e água e nitrato. A adsorção dos sólidos suspensos por estes microrganismos promove o crescimento das bactérias acelerando a decomposição da matéria orgânica. Esta mistura de matéria orgânica e microrganismos dá origem ao lodo. Como o lodo tem a capacidade de aglutinar e decantar, na próxima fase, no decantador secundário, o lodo é separado da fase líquida e parte dos sólidos decantados é recirculado por meio de bombeamento até o reator biológico garantindo uma quantidade adequada de microbiota no tanque de aeração. A taxa de recirculação pode variar de acordo com a necessidade do processo e a idade desejada para o lodo (SPERLING, 2016; JORDÃO, PESSOA, 2014). De acordo com Batistella, 2015:

No sistema de lodos ativados convencional, o lodo permanece no sistema de 4 a 10 dias. Com este período, a biomassa retirada no lodo excedente requer ainda uma etapa de estabilização no tratamento do lodo, por conter ainda um elevado teor de matéria orgânica na composição (VON SPERLING, 2007c). Em sistemas de lodos ativados com aeração prolongada o lodo permanece mais tempo no sistema (18 a 30 dias), se apresentando digerido com menor teor de matéria orgânica e maior teor de sólidos fixos, não necessitando de uma etapa posterior de estabilização. Este

lodo é submetido à desidratação e higienização para finalmente ser disposto em solo agrícola, aterros e processos de conversão termoquímicos (VON SPERLING, 2007c).

A Figura 13 a seguir apresenta um esquemático do processo.

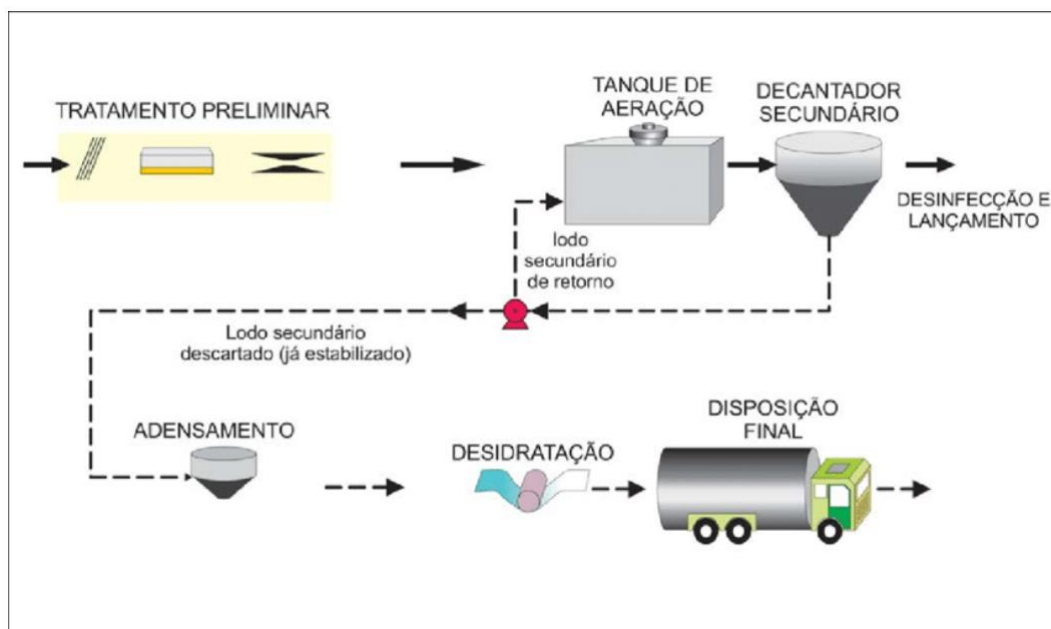


Figura 13 – Diagrama Esquemático do sistema de lodos ativados para o tratamento de esgotos. Fonte: Poence, Rollemberg, 2019.

Nos processos aeróbios cerca de 40% a 50% da matéria orgânica é oxidada a gás carbônico enquanto que 50% a 60% é convertida em biomassa microbiana, por meio da promoção da proliferação desta biota. Dependendo das condições de operação do reator, uma pequena parcela de matéria orgânica (5% a 10%) pode deixar o reator sem estar degradado. (Chernicharo, 2007a). Isto indica uma quantidade relativamente grande de produção de lodo para este tipo de tratamento em relação aos tratamentos anaeróbios que serão descritos a seguir.

Com relação aos tratamentos anaeróbios de efluentes, destaca-se, devido à maturidade de seu estado tecnológico e ampla difusão no país e no mundo, o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) também conhecido na sigla em português como Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente – RAFA. Como o próprio nome sugere, nestes reatores o efluente segue em fluxo ascendente passando por uma zona de digestão onde bactérias anaeróbias consomem a matéria orgânica gerando principalmente gás metano por meio de uma série de processos

complexas sequências de decomposição: hidrólise, acidogênese, acetogênese e, finalmente, metanogênese. O reator conta ainda com uma zona de sedimentação e de coleta do gás gerado no interior do reator (Chernicharo, 2007a).

Este processo de tratamento, apresenta um consumo de energia muito inferior, quando comparado ao processo de lodo ativado, por dispensar a etapa de aeração, menor geração de lodo e, por conseguinte, menor custo de manejo deste resíduo e ainda a possibilidade de produção e utilização do gás metano como combustível. No entanto, o processo pode gerar odores desagradáveis e é mais sensível à variações nas características do efluente tratado, como carga orgânica, temperatura e pH e apresenta período de partida mais longo a menos que seja inoculado com lodo de outra estação (Chernicharo, 2007b).

Ainda com relação à produção de lodo neste processo destaca-se que 70% a 90% da matéria orgânica é convertida em biogás e apenas 05 a 15% transformasse em biomassa microbiana. Essas características porém, trazem um empecilho: o material não digerido pelo reator pode chegar a 30% (contra um limite teórico de 10% nos processos aeróbios). Isso faz com que, sozinho, os reatores anaeróbios normalmente não atendam aos limites de remoção de carga orgânica necessários para disposição do efluente final em corpos d'água e tenham de ser utilizados como fase predecessora de um tratamento aeróbio. Estes tratamentos combinados trazem vantagens operacionais uma vez que permitem a captação do biogás na fase anaeróbia, que pode ser usado para auxiliar na secagem do lodo produzido, e diminuem significativamente (da ordem de 70%) a carga orgânica a ser tratada no reator aeróbio, o que converte-se na diminuição da área necessária para o tanque de aeração e do consumo de energia elétrica neste processo (SPERLING, 2016; JORDÃO, PESSOA, 2014; Batistella, 2015; Chernicharo 2007b). As Figuras 14 e 15 a seguir apresentam um projeto de um reator UASB convencional em fibra de vidro e um esquemático de um processo de tratamento com este tipo de reator seguido de um processo aeróbio complementar, respectivamente.

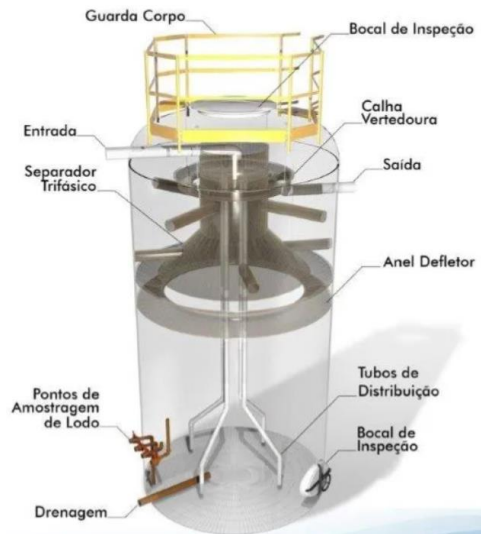


Figura 14 – Reator UASB/RAFA em fibra de vidro. Fonte: SANEFLUX.

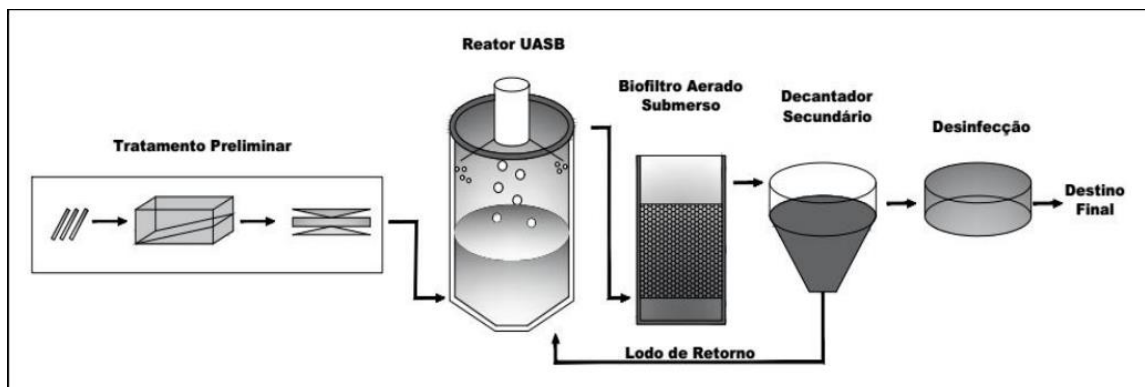


Figura 15 - Diagrama Esquemático do para o tratamento de esgotos com reator UASB seguido de um tratamento aeróbio. Fonte: Assis, 2017.

As estratégias de tratamento de esgoto existentes sempre produzirão lodo em determinada proporção. Portanto fazem-se necessárias a avaliação de alternativas para sua destinação e a adoção de métodos que considerem as características do esgoto, o volume produzido, as tecnologias disponíveis e seus custos de implantação e operação, a localidade da estação, a legislação vigente entre outros fatores que examinem de forma abrangente critérios técnicos, econômicos e ambientais (Chernicharo et. al, 2015).

O Brasil produz anualmente 220 mil toneladas de lodo (base seca) que são destinados a aterros sanitários o que traz elevado custo para a sociedade e desperdiça o potencial deste material (Embrapa, 2019).

O lodo proveniente de ETEs, também tratado no Planares como RSB – Resíduo de Saneamento Básico, quando colocado em conjunto com lodo de ETA, sólidos grosseiros (material gradeado) e areia deve ter tratamento e tendência semelhante àquela vislumbrada para os RSU.

No Brasil, a principal alternativa para o destino do lodo é o aterro sanitário, o que resulta em elevados gastos com transporte e desperdício do seu potencial energético. Considerando os benefícios referentes à recuperação energética do lodo, os processos térmicos, amplamente empregados para outras fontes de biomassa, têm ganhado destaque [...]. (Rosa e Chernicharo e Melo, 2014).

O desenvolvimento de uma estratégia sustentável para o manejo do lodo de estações de tratamento de esgoto tem se tornado cada vez mais necessário. Além das pressões sociais crescentes, a preocupação com o meio ambiente e uma agenda corporativa alinhada a conceitos ESG (Environmental, Social and Governance), ressalta-se ainda que os custos do manejo de lodo nas estações podem corresponder a 50% dos custos operacionais. Mesmo assim, de maneira geral o gerenciamento do lodo das ETEs muitas vezes resume-se à regularização da burocracia para destinação no aterro mais próximo não sendo exploradas outras alternativas menos comuns, mas que poderiam trazer diversos benefícios ao meio ambiente, além de benefícios financeiros relevantes para a operação das estações (SPINOSA et al. 2011).

Entre as principais alternativas para o tratamento do lodo, destacam-se os processos térmicos, nos quais o processamento do lodo ocorre pela destruição química dos polímeros a elevadas temperaturas, sob condições controladas de temperatura, pressão, teor de oxigênio, tempo de reação, entre outros fatores. Os processos térmicos mais comuns são a pirólise, a gaseificação e a combustão/incineração. (Rosa e Chernicharo e Melo, 2014).

No entanto, a incineração se faz viável para grandes plantas acima de 500 toneladas de RSU por dia ou 250 toneladas desde que seja empregado combustível auxiliar (MIRANDA, 2014). Já as alternativas de combustão, gaseificação e pirólise podem ser viabilizadas em menor escala.

A fim de avaliar seu potencial térmico Chernicharo et al (2015) agrupa as características do lodo desidratado de acordo com diversos autores verificando

sua composição elementar e imediata e seu poder calorífico superior e inferior. A Tabela 04 traz os resultados para a caracterização do lodo de esgoto para estudo de aproveitamento térmico. Segundo o autor, deseja-se observar elevado percentual de carbono e hidrogênio, componentes que irão desprender energia e podem ser oxidados, e reduzida proporção de água e oxigênio. Tal constituição deverá fornecer os maiores níveis de poder calorífico.

Tabela 4 – Características do lodo desidratado de acordo com diversos autores. Fonte Chernicharo et. al, 2015.

Origem do lodo	Composição elementar (%), b,s					Composição imediata (%), b,s				Potencial energético (MJ.kg <sup>-1</sup> ), b,s		Fonte
	C	H	N	S	O	SV	SFa	A	w	PCS	PCI	
Lodo desidratado (seco ou processado termicamente)												
LDAn	36,4	5,9	5,2	1,0	19,0	59,8	7,5	32,5	6,4	17,11	13,55	Arjham et al. (2013)
LB+S	30,2	3,7	4,3	1,0	6,4	38	7,9	54,4	7,3	10,9	-	Trinh et al. (2013)
LDAn (LA)+S	23,1-39,9	3,8-5,9	2,5-7,9	0,8-1,0	18,8-23,5	38,3-66,8	0,9-19,7	22,6-52,0	1,5-7,1	-	-	Fonts et al. (2012)
LDAn (LA)+S	37,4	5,3	6,6	0,9	17,3	59,2	8,4	32,4	6,8	16,5	-	Otero et al. (2010)
LDAn (LA) + S	28,5	4,3	4,1	0,8	19,5	50,4	6,8	42,8	6,7	12,3c	11,2c	Fonts et al. (2009)
	23,1	3,1	3,2	0,9	14,7	40,4	4,6	54,9	5,3	8,9c	8c	
	27,7	4,4	3,2	0,8	19,7	50,2	5,7	44,1	7,1	11,9c	10,8c	
UASB+LAe	27,5	4,3	4,4	0,9	15,3	43,3	-	47,6	9,1	20,1	18,6	Borges (2008)
-	17,4	6,7	3,8	-	20,3	-	-	51,8	31,7	-	-	Ginoris (2010)
-	32,8	4,5	4,4	1,7	18,9	-	-	37,5	20	9,9c	8,8c	Faaij et al. (1997)
-	25,6	4,4	4,6	1,1	22,0	-	-	42,4	15	14c	-	Groß (2008)
-	22,7	3,3	3,1	1,6	13,3	44,5	-	55,9	3,9	9,5	-	Otero et al. (2008)
Lodo desidratado												
LP	51,5b	7b	4,5b	1,5b	35,5b	65	-	-	-	15,1	-	Manara e Zabaniotou (2012)
LDAn	49b	7,7b	6,2b	2,1b	35b	50	-	-	-	10,8	-	
-	20,6	3,1	1,6	1,2	21,0	46,3	1,3	52,4	84,1	7,67	-	Xu et al. (2012)
LDAe	19,8	3,6	2,1	-	20,5	42,9	3,8	53,3	58,7	8,7c	2,0 c	Rosa et al. (2011)
-	36,4	5,5	3,6	-	25,5	60,1	10,9	29	-	17,5	-	Courtaud et al. (2010)
LDAn (LA)	29,2	4,7	2,9	<1,0	-	-	-	-	72,8	11,5	-	
LDAn (LA)	33,6	5,1	5,4	<1,0	-	-	-	-	77,7	12,6	-	Font et al. (2001)
LDAn (LA)	33,6	5,2	4,2	<1,0	-	-	-	-	80,4	13,7	-	
LB	40,8	4,4	5,7	0,0	16,8	67,6	-	32,4	65	16,5	3,5c	Houdkova (2008)
LDAn (LA)	30,8	4,1	3,6	1,1	9,6	49,2	-	50,8	65	12,2	2,1c	

**Nota:** LDAn: lodo digerido anaerobiamente, LDAe: lodo digerido aerobiamente LA: lodos ativados, LAe: lagoa aerada, S: secagem, LP: lodo primário, LB: lodo bruto. SV: sólidos voláteis, SF: sólidos fixos, A: cinzas, w: umidade, PCS: poder calorífico superior, PCI: poder calorífico inferior, N.d: não detectado, (-) não analisado, b,s: base seca, a: carbono fixo, b: base combustível (livre de cinzas), c: base de trabalho.

Como pode ser observado existe relevante variação entre os resultados obtidos para diferentes autores considerando-se o mesmo tipo de tratamento. Daí, avalia-se a importância da caracterização do lodo da estação que for alvo de análise para tomada de decisão.

Para efeito de comparação, de acordo com Çengel (2013), o PCI da gasolina é 44 MJ/kg, ou seja, a depender do tratamento e condição do resíduo, seu PCI pode chegar a 42% daquele apresentado pelo hidrocarboneto.

Cabe ressaltar também o expressivo aumento observado no PCI do lodo quando o mesmo é submetido à processos térmicos e secagem. Nestas condições os valores obtidos podem superar os da madeira. O estudo do autor apresenta ainda comparação com o poder calorífico de outras fontes de biomassa em função da umidade, conforme ilustrado no gráfico da Figura 16.

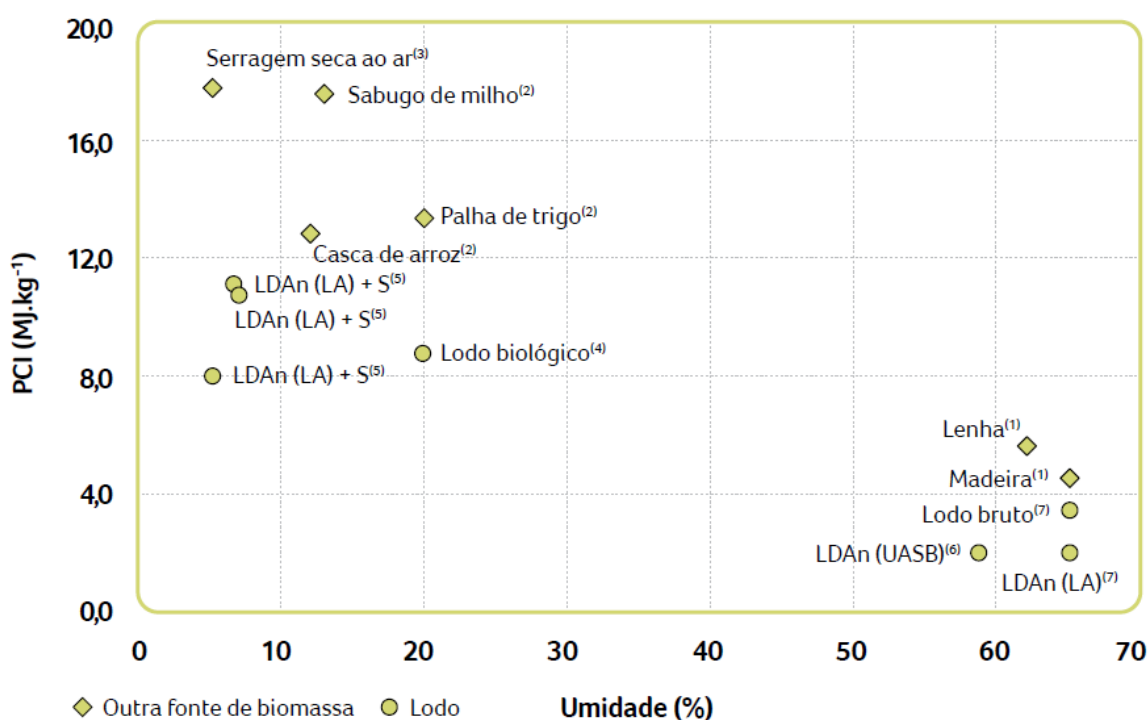


Figura 16 – Poder calorífico inferior de diversas fontes de biomassa, em função da umidade. Fonte Chernicharo et. al, 2015.

Os processos de combustão, pirólise e gaseificação já são empregados para outros tipos de biomassa e, mais recentemente, estas tecnologias têm sido estudadas para o emprego no lodo de ETEs. Algumas das questões técnicas a serem propostas são a necessidade de desidratação do lodo, a fim de melhorar seu poder calorífico e problemas relacionados à presença de elementos inorgânicos e tóxicos com metais pesados em sua composição. O emprego do lodo em coprocessamento com outras formas de biomassa pode ser avaliada para melhoria destas questões (MANARA; ZABANIOTOU, 2012).

A seguir, são detalhadas as principais características de cada um dos processos térmicos verificados.

## **2.3 Processos térmicos**

### **2.3.1 Combustão**

A combustão caracteriza-se por uma reação rápida e exotérmica entre um combustível e um comburente (oxidante). Idealmente a biomassa será oxidada a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (Batistella, 2015). Este processo é indicado quando o propósito é a obtenção de energia pela queima da biomassa e não há preocupação com a presença de poluentes que exijam tratamento especial dos gases produto da queima como dioxanas e furanos (Cherniraro et. al, 2015).

A eficiência do processo está condicionada às propriedades físico-químicas e térmicas do combustível tais como densidade, porosidade, granulometria, forma, poder calorífico, condutividade, teor de umidade e temperatura. As tecnologias de combustão atuais têm maturidade tecnológica superior àquelas observada para a pirólise e gaseificação e estão bem difundidas em todo o mundo (Batistella, 2015). Segundo Batistella (2015) as tecnologias mais comumente adotadas para a queima de lodos de esgoto são os fornos de leito fluidizado, ciclone, fornos rotativos e queimadores de leito móvel, sendo os primeiros os mais comuns. Além da possibilidade de geração de energia por meio turbinas à gás o calor gerado pela queima pode ser empregado para melhorar a secagem do lodo, tornando o processo ainda mais eficiente uma vez que diminui sua umidade.

Além do dióxido de carbono e vapor d'água outros subprodutos da combustão são relevantes e devem ser analisados para se determinar o tipo adequado de controle a ser adotado. Podem ser gerados também SO<sub>x</sub>, HCl, HF, CO, NO<sub>x</sub>, particulado e metais tais como Cd, Hg, As, V, Cr, Co, Cu, Pb, Mn, Ni e Tl, entre outros e, a depender da composição do lodo. Também são gerados resíduos sólidos como cinzas e escórias (FEMA, 2012 in Miranda, 2014).

A Figura 17 a seguir apresenta uma representação de forno de leito fluidizado. O equipamento consiste de um vaso coberto internamente de material refratário cujo fundo é preenchido com areia, alumina ou material semelhante (leito). O ar que

participará da queima faz um fluxo ascendente no interior do equipamento mantendo o material do leito em suspensão, que se mistura ao combustível criando um fluido.

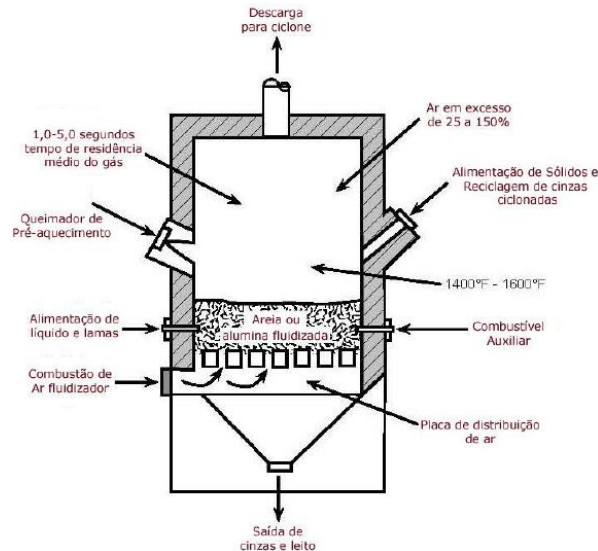


Figura 17 – Forno de leito fluidizado. Fonte: Miranda, 2014.

### 2.3.2 Pirólise

Consiste em um processo de degradação térmica a temperaturas intermediárias (400 a 800°C) com ausência ou baixa quantidade de oxigênio. O processo é endotérmico, portanto requer fornecimento de energia (calor) externo para que a reação ocorra (Miranda, 2014; Cherniraro et. al, 2015).

Os principais subprodutos do processo são o carbono sólido (char), cinzas, o óleo pirolenhoso ou pirolítico, vapor d'água e gases como monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio, metano entre outros hidrocarbonetos de baixa densidade que podem ser utilizados para auxiliar na secagem do lodo, assim como ocorre no caso da combustão.

O óleo gerado pode ser utilizado como óleo combustível em caldeiras ou pode ser sintetizado em subprodutos mais refinados por meio de processo químicos adequados. Com relação à fração sólida obtida, o char tem potencial combustível e pode ser utilizado para a produção de carvão ativado. As cinzas concentram metais pesados e sua lixiviação é mais difícil dessa forma, o que traz benefícios para sua disposição em aterros (Batistella, 2015; FEMA, 2012. Miranda, 2014).

A Figura 18 abaixo ilustra o reator pirolítico e suas diferentes fases.

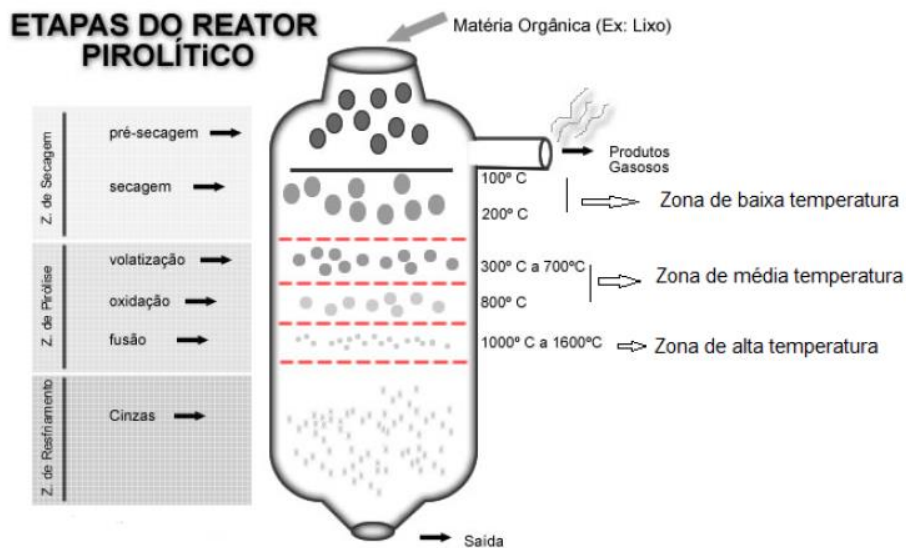


Figura 18 – Reator pirolítico. Fonte: Miranda, 2014.

### 2.3.3 Gaseificação

No processo de gaseificação o carbono presente na matéria orgânica é convertido em gases por meio de um processo termoquímico a elevadas temperaturas (800°C a 1400°C) em um ambiente com deficiência de oxigênio gerando um composto gasoso conhecido como gás de síntese (syngas) constituído principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio, mas apresentando também outros constituintes com dióxido de carbono, metano, nitrogênio, hidrocarbonetos leves e vapor d'água (Carbogás; Cherniraro et. al, 2015).

Diferente do que ocorre na combustão, a baixa disponibilidade de oxigênio impede a formação de componentes tóxicos como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, dioxidas e furanos, o que confere maior viabilidade financeira ao projeto uma vez que é dispensada a implantação de controles mais sofisticados dos gases produzidos. Além disso o gás de síntese tem potencial combustível e pode ser utilizado inclusive para produção de energia elétrica em motores ciclo Otto (Carbogás; Batistella, 2015; FEMA, 2012).

Os gaseificadores estão em estágio tecnológico mais avançado que os processos pirolíticos. No Brasil, a empresa Carbogás tem uma planta em operação na cidade

de Mauá com potência de 1MWt e geração de energia com motor de 200kWe. (Carbogás, Moreira, 2021). A empresa também oferece como produto uma planta modular de gaseificação utilizando-se de um gaseificador de leito fluidizado para o tratamento de RSUs recomendada para municípios acima de 20.000 habitantes ou consórcios (Carbogás). As características do gás gerado e sua composição média (considerando a utilização com RSU) é apresentado na Tabela 05 a seguir.

Tabela 5 – Características e composição típica do gás de síntese gerador pela planta de gaseificação da Carbogás a partir do processamento de RSU. Fonte: Adaptado de Carbogás.

Características Físicas				Composição Química			
Poder Calorífico inferior médio	1.160 kcal/Nm <sup>3</sup>	CO	18,8 %	CO <sub>2</sub>	10,0 %		
Pressão do gás	600 a 1000 mmca	H <sub>2</sub>	14,0 %	H <sub>2</sub> O	6,0 %		
Temperatura do gás	40 °C	CH <sub>4</sub>	3,0 %	N <sub>2</sub>	49,0%		

Outros autores apresentam valores médio para a composição de gás de síntese adotados na literatura sobre o tema. Miranda (2014) apresenta estes valores típicos a partir da consulta de diversos autores, que são apresentados na Tabela 06 a seguir.

Tabela 6 – Composição média do gás de síntese.

Componentes	Concentração (%)
CO	8 a 25
H <sub>2</sub>	13 a 15
CH <sub>4</sub>	3 a 9
CO <sub>2</sub>	5 a 10
N <sub>2</sub>	45 a 54
H <sub>2</sub> O	10 a 15

Além da produção de energia elétrica por meio de motores ciclo Otto, o gás de síntese também pode ser utilizado para produção de calor, que poderia ser empregado na secagem do lodo, e como matéria prima para sintetização de diversos combustíveis e outros hidrocarbonetos por meio do processo de Fischer-Tropsch.

Assim como ocorre nos fornos com leito fluidizado, nos gaseificadores de leito fluidizados o combustível a ser processado é mantido em suspensão em um leito de material inerte propiciado pela alimentação ascendente de algum fluido – no caso dos gaseificadores a vapor d'água, ar ou oxigênio. A utilização de oxigênio puro remove da constituição do gás de síntese gerado a presença de nitrogênio, elevando significativamente seu poder calorífico (Miranda, 2014).

Chernicharo et. al (2015) promove a comparação entre os três métodos de aproveitamento térmico para o tratamento de lodos de ETEs. As tabelas 07 e 08 a seguir apresentam este comparativo com relação aos processos e suas vantagens e desvantagens, respectivamente.

Tabela 7 – Comparação de processos térmicos para lodos de ETEs. Fonte: Chernicharo et. al (2015).

Parâmetro de comparação	Pirólise	Gaseificação	Combustão
Requerimento de secagem prévia	Sim <sup>1</sup>	Sim	Não
Temperatura de operação (°C)	400-800	800-1.400	850-950 <sup>2</sup>
Pressão para operação	Ambiente ou ligeiramente inferior/superior <sup>3</sup>	Ambiente	Ambiente
Condições de reação	Ausência de oxigênio	Deficiência de oxigênio, possível adição de água, dióxido de carbono	Ar
Subprodutos típicos (%)	Gás (até 50), carvão (até 40), óleo (até 40)	Syngas (até 90), carvão (até 30), óleo (até 5)	Cinzas (até 30), gases de exaustão (até 90)
Produtos gasosos	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, álcoois, aldeídos, fenóis etc.	CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> etc.	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> etc.
Quantidade dos gases produzidos	Variável <sup>4</sup>	Muito alta	Muito alta
Utilidade dos gases	Cogeração	Cogeração	-
Utilidade dos líquidos	Cogeração	-	-
Utilidade dos sólidos	Cogeração, agricultura	Agricultura	Agricultura

**Notas:** <sup>1</sup>Requerimento de 150 °C para um nível de 25% de sólidos. <sup>2</sup>Temperatura mínima, a máxima depende de condições de chama.

<sup>3</sup>Depende do principal produto final almejado (vapores ou sólidos). <sup>4</sup>Depende da pressão e velocidade de aquecimento do substrato (rápida ou lenta).

Tabela 8 – Vantagens e desvantagens dos processos térmicos avaliados. Fonte: Chernicharo et. al (2015).

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
<b>Pirólise</b>	<p>Processo não demanda queima. Processo flexível e versátil. Produção de elevada quantidade de óleo, que pode ser utilizada em vários processos químicos ou cogeração. Redução de volume do lodo da ordem de 90% e geração de material inerte. Exclusão da formação de subprodutos tóxicos (dioxinas), em virtude da operação em baixas temperaturas e atmosfera redutora. Formação dos produtos finais (gás, carvão e óleo), os quais apresentam potencial de serem aproveitados na forma de combustível. Elevada taxa de conversão dos subprodutos à energia. Moderado poder calorífico dos gases gerados na pirólise, da ordem de 15 MJ/m<sup>3</sup>.</p>	<p>Elevado custo operacional e de manutenção. Elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos. Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com potencial concentração dos metais pesados originalmente presentes no substrato. Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo. Baixa maturidade tecnológica. Menor liberação de energia no próprio processo; poder calorífico continua significativo nos subprodutos.</p>
<b>Gaseificação</b>	<p>Produção de energia e redução do volume de resíduos produzidos. Produção de gás após a gaseificação do lodo com moderada a boa qualidade e inflamabilidade, o qual pode dar suporte a processos de secagem do próprio lodo. Potencial de geração de energia elétrica a partir do gás em benefício da ETE. Elevado rendimento na conversão à eletricidade. Reduzida emissão de poluentes. Produção de resíduo sólido inerte.</p>	<p>Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados. Demanda prévia de desidratação e secagem do lodo. Tecnologia complexa e pouco disponível comercialmente. O alcatrão formado durante o processo de gaseificação, se não completamente queimado, pode limitar as aplicações do <i>syngas</i>.</p>
<b>Combustão</b>	<p>A cocombustão de lodo e combustível convencional possui menor investimento. Recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), permitindo a redução de custos operacionais. Dispensável, em muitos casos, a secagem do lodo, havendo somente a necessidade da etapa de desidratação do material. Elevada redução do volume do lodo, em torno de 90%. Remoção de praticamente todos os componentes orgânicos. Possibilidade de utilização das cinzas resultantes do processo. Alta taxa de liberação do poder calorífico e potencial de aproveitamento energético.</p>	<p>Custo elevado de implantação e operação. Geração de uma fração sólida que inclui substâncias inertes e cinzas com elevada constituição de metais pesados. Potencial de geração de compostos como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl, HF, assim como de metais pesados, dioxinas e furanos. A combustão direta do lodo pode caracterizar incineração. Demanda prévia de desidratação do lodo. Elevados custos para o controle ambiental, devido à limpeza dos gases.</p>

Os três processos apresentam com vantagem expressiva redução no volume de resíduo a ser encaminhado para aterros sanitários e recuperação de energia presente no lodo. São alternativas interessantes para os problemas descritos até aqui:

- a) Necessidade de redução do volume de lodo destinado aos aterros uma vez que esta ação representa elevado custo operacional e, com o crescimento da população e da cobertura de esgoto no país, uma dificuldade do ponto de infraestrutura envolvendo a disponibilidade de capacidade nos aterros sanitários;
- b) Imperativa redução da geração ou possibilidade de geração de GEEs devido à destinação de lodos de ETEs aos aterros sanitários;
- c) Preocupante crescimento da demanda de energia elétrica para o tratamento de esgoto sanitário frente ao crescimento da população e da cobertura de esgoto no país, conforme metas governamentais.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Premissas

Para a avaliação de viabilidade de implantação do processo térmico para tratamento do lodo são consideradas algumas premissas descritas a seguir.

##### 3.1.1 Estação de Tratamento de Esgoto avaliada

É considerada neste estudo a ETE Pararangaba, localizada no município de São José dos Campos, a 100 km de São Paulo, município localizado no Vale do Paraíba. A estação em questão é operada pela Sabesp – Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. A Tabela 9 a seguir apresenta as principais características da estação.

Tabela 9 – Características técnicas da ETE Pararangaba

<b>Estação</b>	<b>ETE Pararangaba</b>
Tipo de Tratamento	Lodo ativado com aeração prolongada
População atendida	200.000 habitantes
Vazão média atual	210 litros/segundo
Vazão de projeto	404 litros / segundo
Ano de inauguração	2016
Produção de lodo média (base seca)	14 toneladas / dia
Produção de lodo média (base úmida)	17,5 toneladas / dia
Umidade do lodo (média)	80%
Tipo de desaguamento	Decanter Centrífugo

A análise se pautará na avaliação de implantação de um sistema de tratamento térmico na referida estação considerando seus dados operacionais.

##### 3.1.2 Características do lodo

Para esta avaliação serão consideradas as informações apresentadas pelo autor Borges et. al (2008) que caracterizou amostras de lodo provenientes de estações de tratamento de esgoto sanitário por meio de análise química elementar e aproximada além de definir o poder calorífico superior e inferior e comportamento térmico da amostra. Os dados relevantes para análise são o poder calorífico

(superior e inferior) e as concentrações de carbono, hidrogênio e oxigênio bem como a concentração de cinzas. Estes são exibidos na Tabela 10 para o lodo desidratado (não processado termicamente).

Um ponto determinante para seleção deste autor em detrimento de diversos outros, é que o autor informa que o esgoto recebido pela estação analisada recebe efluente de área industrial, não apenas doméstica. Ele utiliza tal argumento para justificar o baixo teor de carbono encontrado na amostra. Assim como a ETE analisada por Borges et. al (2008) as ETEs do Vale do Paraíba também recebem, de maneira geral, efluente de regiões industriais e, por isso, esperasse que os valores apresentados pelo autor estejam mais próximos aos dessas estações.

Tabela 10 – Características e composição do lodo – Adaptado de Borges et. al (2008)

Processo de tratamento	Composição Elementar (%) base seca					Composição imediata (%) base seca				Potencial Energético (MJ/kg)	
	C	H	N	S	O*	SV	ST	A	w	PCS	PCI
RALF + LA	27,5	4,32	4,40	0,86	23,4	43,3	90,9	47,6	9,05	20,1	18,6

RALF – Reator anaeróbio de leito fluidizado, LA – Lodo ativado, C – Carbono, H – Hidrogênio, N – Nitrogênio, S – Enxofre, O – Oxigênio, SV – Sólidos Voláteis, ST – Sólidos Totais, A – cinzas, w – umidade, PCS – Poder calorífico superior, PCI – Poder calorífico inferior.

\*Os valores de composição elementar para oxigênio não foram apresentados em Borges et. al. Este percentual foi obtido a partir da média dos valores de concentração deste componente para lodo desidratado apresentado em Chernicharo et. al (2005) – vide Tabela 4.

### 3.2 Seleção do processo térmico

Este trabalho buscou detalhar os princípios de funcionamento e aplicabilidade de três principais processos térmicos: a incineração, combustão, pirólise e a gaseificação.

No que tange ao processo de incineração, conforme apresentado na revisão bibliográfica, o processo apresenta viabilidade para valores acima de 500 t / dia ou a partir de 250 t / dia se complementado com combustível auxiliar. Como essas quantidades superam significativamente a produção de lodo diária da ETE em

análise conclui-se que este processo não é adequado para a problemática em questão. O processo de incineração fará sentido no tratamento de lodos de grandes centros urbanos (metrópoles) ou em complemento com tratamento de RSU nestas regiões ou ainda, por meio de consórcios para o tratamento de lodo de vários pequenos e médios municípios em conjunto. Para o caso em questão avalia-se que a solução é impraticável.

A combustão apresenta como principais vantagens não demandar a secagem do lodo mas apenas sua desidratação. Em processo tecnológico mais maduro, a combustão permite o reaproveitamento energético e a redução de custos operacionais devido a expressiva redução da parcela a ser encaminhada ao aterro sanitário. No entanto, observa-se elevados custos para o tratamento dos gases gerados uma vez que a queima do lodo, devido à presença de metais pesados e outros contaminantes em sua composição, gerará NOx, SOx além de furanos e dioxanas. O controle ambiental para este tipo de poluentes é caro tornando o processo bastante custoso além de os riscos de falha nesse controle poder acarretar em severas multas.

A pirólise, em função da operação em temperaturas inferiores àquelas observadas no processo de combustão e em função de sua atmosfera redutora, não propicia a geração de subprodutos tóxicos como as dioxanas. Assim como a combustão, a pirólise também confere redução expressiva no volume de sólidos a serem destinados ao aterro e geram material inerte. Entretanto, a tecnologia ainda se apresenta em estado de baixa maturidade. A pesquisa não encontrou nenhum caso real do uso de pirólise para tratamento de lodo. Segundo Chernicharo et. al. (2015) o processo tem elevado custo operacional e de manutenção, bem como elevado custo de tratamento de efluentes gasosos e líquidos.

Já a gaseificação mostra-se como alternativa mais viável para tratamento de lodo e RSU em quantidades inferiores àquelas necessárias para viabilidade da incineração. Com emprego amplo em RSU e casos de aplicação no Brasil a planta de gaseificação já é disponível em tecnologia nacional e sua aplicação torna-se viável a partir de 50 toneladas por dia de resíduo a ser tratado. Bem como os demais processos térmicos, a gaseificação confere expressiva redução da massa

sólida a ser destinada aos aterros e o gás de síntese gerado tem poder calorífico suficiente para ser queimado em motores a combustão para geração de energia elétrica ou, no caso das ETEs, ele poderia ser queimado em uma fornalha e a energia térmica produzida poderia auxiliar na secagem do lodo que sai do processo com ainda com grande umidade após passar pelos decanters centrífugos (80%). O processo também apresenta reduzida geração de poluentes e não requer grandes investimentos no tratamento dos gases gerados uma vez que, o gás de síntese (syngas) é de interesse.

O processo tem potencial para conferir expressiva economia circular às estações de tratamento de efluentes e existem casos de sucesso na aplicação com RSU, como por exemplo a planta piloto da Carbogás em Mauá com gaseificador de leito fluidizado de 1MWt (Carbogás, Simões et. al., 2021). Segundo fabricante as plantas tornam-se viáveis para municípios a partir de 20.000 habitantes, o que corresponde a um volume aproxima de 20 toneladas de RSU por dia. A figura 19 apresenta uma planta de gaseificação da Carbogás para geração de energia elétrica.

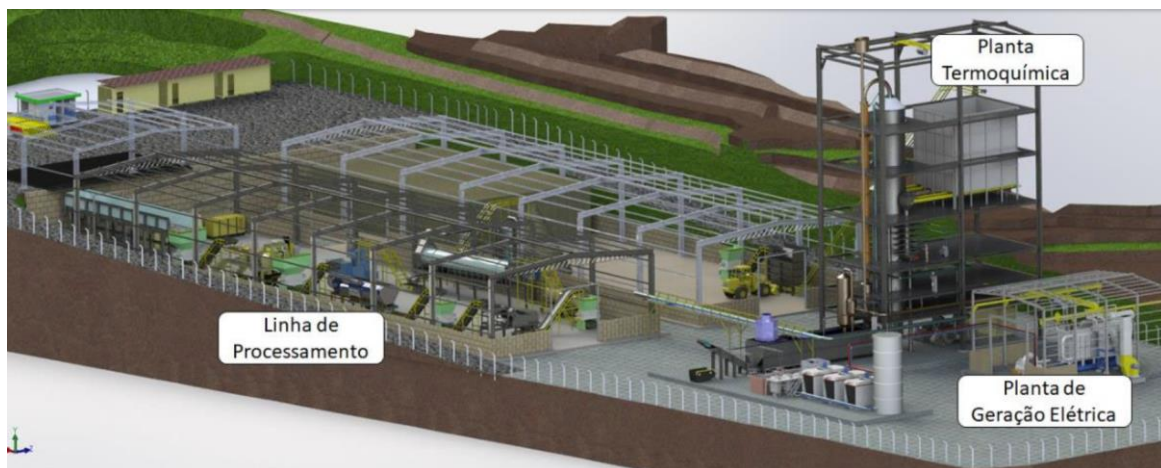


Figura 19 – Planta de gaseificação da Cabogás. Fonte: Carbogás.

A planta em questão foi montada em parceria com a Furnas Centrais Elétricas na cidade de Boa Esperança em Minas Gerais. Uma foto da planta é apresentada na Figura 20. Na estação em questão, o syngas é queimado em uma caldeira a gás para acionar uma turbina a vapor.



Figura 20 – Planta de gaseificação de Furnas. Fonte: Carbogás, Furnas.

Pelos motivos apresentados e considerando o volume de lodo gerado na estação seleciona-se o processo térmico de gaseificação para análise.

### **3.3 Análise Técnica e Financeira**

A partir das informações de caracterização do lodo obtidas de literatura foi realizado contato com a empresa Carbogás, solicitando a especificação e cotação de uma planta de gaseificação com intuito de se efetuar a queima do syngas em uma fornalha para secagem do lodo. O objetivo é reduzir a umidade do lodo gerado na ETE dos atuais 80% para próximo de 18% a fim de torná-lo mais compatível com a umidade de entrada exigida pelo gaseificador. Desta forma busca-se elevar seu PCI com a redução do teor de água no material. Além disso, naturalmente, tem-se como objetivo final a redução do custo de disposição e transporte do lodo em aterro.

A figura 21 apresenta o esquemático para planta proposta.

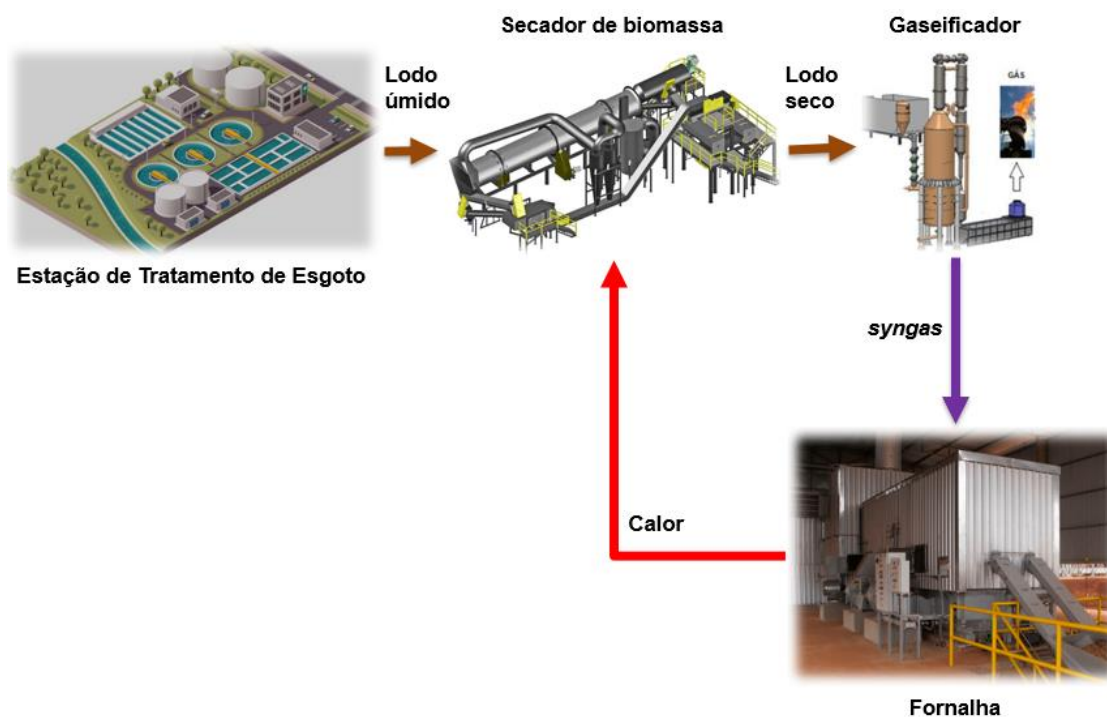


Figura 21 – Solução para tratamento de lodo incluindo gaseificador, fornalha e secador. Fonte: Adobe, Vulcan Drying Systems, Carbogas, Componente

Em contato preliminar, a empresa informou que a viabilidade do projeto deveria se dar a partir de 50 toneladas de lodo por dia. Para se chegar a esta quantidade, é proposta a junção dos lodos de outras três ETEs no Vale do Paraíba, todas operando por meio de lodo ativado com algumas variações e com descarte de lodo para aterro sanitário. Todas as ETEs em questão destinam seu lodo para o Aterro Sanitário SPE localizado no município de Tremembé. A tabela 11 apresenta os principais dados para as quatro ETEs objeto de estudo.

Tabela 11 – Características técnicas das ETEs Pararangaba, Lavapés, Taubaté-

### Tremembé e Campos do Jordão

<b>Estação</b>	<b>ETE Pararangaba</b>	<b>ETE Lavapés</b>	<b>ETE Taubaté-Tremembé</b>	<b>ETE Campos do Jordão</b>
Tipo de Tratamento	Lodo ativado com aeração prolongada	Lodo ativado com aeração prolongada	Lodo ativado com aeração prolongada	Câmara anóxica + Lodo ativado com aeração prolongada + membranas ultrafiltrantes
População atendida	182.434 habitantes	547.303 habitantes	365.629 habitantes	52.405 habitantes
Vazão média atual	210 L/s	600 L/s	465 L/s	140 L/s
Vazão de projeto	404 L/s	1168 L/s	1050 L/s	250 L/s
Ano de inauguração	2016	2014 (ampliação)	2010	2013
Produção de lodo média (base seca)	14 t / dia	35 t / dia	21 t / dia	12 t / dia
Produção de lodo média (base úmida)	70 t / dia	175 t / dia	105 t / dia	60 t / dia
Umidade do lodo (média)	80 %	80 %	80 %	80 %
Tipo de desaguamento	Decanter Centrífugo	Decanter Centrífugo	Decanter Centrífugo	Decanter Centrífugo
Distância até o aterro	40 km	54 km	13 km	47 km
Custo de disposição em aterro	R\$ 400 / t	R\$ 400 / t	R\$ 400 / t	R\$ 400 / t
Custo com transporte do lodo	R\$ 90 / t	R\$ 90 / t	R\$ 50 / t	R\$ 75 / t
Custo total da disposição <sup>1</sup>	R\$ 490 / t	R\$ 490 / t	R\$ 450 / t	R\$ 475 / t
Destinação	Aterro SPE Tremembé Ambiental			

Importante ressaltar que a produção de lodo dá-se apenas em dias úteis, quando há maior número de operadores na planta, possibilitando a operação das centrífugas. O aterro também só recebe lodo em dias úteis. Considera-se para análise 250 dias úteis por ano de geração de lodo.

Considerando o tratamento térmico conjunto do lodo das quatro estações chegaria-se a marca de 82 t / dia base seca. Os dados acima foram fornecidos pela Unidade de Negócios do Vale do Paraíba, Superintendência da Sabesp que opera 26 municípios na região. A figura 22 a seguir mostra a localização das

quatro estações e do aterro sanitário para o qual destinam seu lodo.

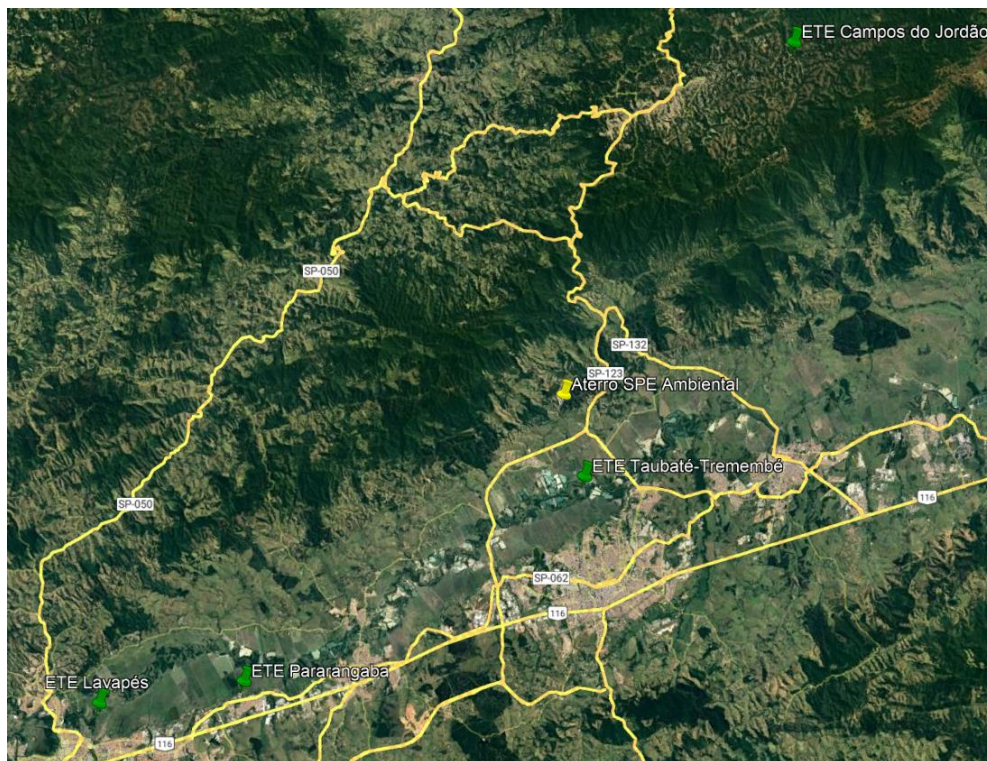


Figura 22 – Localização das ETEs do Vale do Paraíba e do Aterro SEP Ambiental

A partir da avaliação do espaço físico disponível nas quatro estações e considerando o volume de esgoto a ser transportado define-se que ETE Pararangaba é a única que tem área disponível para receber a planta de gaseificação. Em relação a planta apresentada na Figura 19, a planta a ser implantada requer área bastante inferior, uma vez que todo o tratamento preliminar é substituído apenas pelo secador e a caldeira e o conjunto motogerador pela fornalha.

Com a alteração do transporte em relação ao cenário atual estima-se a redução do custo de transporte e destinação do lodo. As tabela 12 e 13 apresentam os valores obtidos. Importante observar que, para o transporte e disposição deve-se considerar a geração de lodo em base úmida, uma vez que toda essa massa já passou pela centrífuga e atualmente é destinada ao aterro.

Tabela 12 – Cenário Atual – Custos de transporte e disposição final de lodo

Cenário Atual - Custos de transporte e disposição final de lodo					
ETE	Disposição de lodo [t/dia]	Custo de disposição	Custo de transporte	Custo total diário	Custo Total Anual
Pararangaba	70	R\$ 28.000	R\$ 6.300	R\$ 34.300	R\$ 8.575.000
Lavapés	175	R\$ 70.000	R\$ 15.750	R\$ 85.750	R\$ 21.437.500
Taubaté	105	R\$ 42.000	R\$ 5.250	R\$ 47.250	R\$ 11.812.500
Campos	60	R\$ 24.000	R\$ 4.500	R\$ 28.500	R\$ 7.125.000
				<b>Total</b>	<b>R\$ 48.950.000</b>

Tabela 13 – Cenário Proposto – Custos de transporte e disposição final de lodo

Cenário Proposto - Custos de transporte e disposição final de lodo					
ETE	Disposição de lodo [t/dia]	Custo de disposição	Custo de transporte	Custo total diário	Custo Total Anual
Pararangaba	1,4	R\$ 3.280	R\$ 738	R\$ 4.018	R\$ 1.004.500
Lavapés	3,5	R\$ -	R\$ 5.250	R\$ 5.250	R\$ 1.312.500
Taubaté	2,1	R\$ -	R\$ 15.346	R\$ 15.346	R\$ 3.836.538
Campos	1,2	R\$ -	R\$ 7.660	R\$ 7.660	R\$ 1.914.894
				<b>Total</b>	<b>R\$ 8.068.432</b>

Para o cenário apresentado na Tabela 13, considera-se:

- A massa a ser disposta no aterro é de 10% da massa de lodo em base seca, uma vez que o gaseificador diminui o volume de sólidos nesta proporção de acordo com a literatura;
- O custo de transporte para a ETE Pararangaba é representado pela soma de 10% das massas de lodo em base seca gerada por todas as ETES multiplicado pelo custo de transporte para esta estação.
- Para as demais ETES o custo de transporte foi obtido proporcionalmente em função da distância ETE X – ETE Pararangaba e do custo de transporte atual da ETE X para para o aterro. Isto é, a quantidade em base úmida transportada atualmente multiplicada pelo custo de transporte atual e pela distância da ETE X até a ETE Pararangaba e dividido pela distância atual da ETE X até o aterro.

Para o cenário apresentado na Tabela 13 observa-se uma acentuada redução nos custos para todas as ETES, especialmente para Pararangaba e Lavapés com 88% e 94%, respectivamente. A redução de custos se mostra um pouco inferior

para as ETEs Taubaté e Campos uma vez que estas estão mais próximas do aterro atualmente. Mesmo assim as reduções são expressivas, chegando a 68% e 73%, respectivamente.

Com esta configuração a massa de lodo a ser tratada termicamente se mantém da ordem de 82 toneladas por dia, base seca, o que equivale a 410 toneladas por dia em base úmida.

Para este cenário verifica-se a quantidade de energia necessária para a secagem do lodo. Esse valor deve nortear o dimensionamento da potência térmica do gaseificador.

Considera-se a temperatura média do lodo na entrada do secador de 20°C. Este é a temperatura estimada para água na saída da torneira em São Paulo (Europa, 2022).

A entalpia específica de evaporação da água para esta temperatura é  $h_{LV} = 2.454,1 \text{ kJ/kg}$  (20°C).

A quantidade de água a ser evaporada considerando-se o recebimento de lodo em base úmida de 410 t/dia – 175 t/dia oriundos da ETE Lavapés, 70 t/dia oriundos da própria ETE Pararangaba, 105 t/dia oriundos da ETE Tremembé e 60 t/dia da ETE Campos – com umidade a 80% e objetivo de se chegar a 18% de umidade, é de 318,9 t/dia. Portanto, a potência total a ser convertida pelo secador, necessária para evaporação da massa de água é calculada na equação (1).

$$P_{\text{secador}} = 310,0 \text{ t/dia} * 2.454,1 \text{ kJ/kg} = 760.771,00 \text{ MJ/dia} \quad (1)$$

Admitindo-se que o secador tenha rendimento de 80%, a potência que a fornalha deverá fornecer ao secador é de 950.963,75 MJ/dia.

Considerando-se a operação da planta de gaseificação por dezesseis horas diárias (dois turnos) todos os dias da semana, a quantidade de energia a ser disponibilizada por hora é apresentada na equação (2).

$$P_{\text{Fornalha}} = \frac{950.963,75}{16} = 59.435,23 \text{ MJ/h} \quad (2)$$

Convertendo-se para Watts, esta potência equivale a 16.509,80 kW, ou seja, 16,5 MWtérmico. E, novamente, considerando-se um rendimento de 90% na conversão térmica da fornalha, o gás de síntese deverá fornecer ao equipamento 66.039,15 MJ/h, ou seja, 18,3 MWtérmico.

De acordo com a Carbogás, o PCI do gás de síntese gerador é da ordem de 1.160 kcal/Nm<sup>3</sup>. Desta forma, a quantidade de gás necessária a ser produzida pelo gaseificador é apresentado na equação (3).

$$Q_{\text{syngas}} = \frac{67.932,74 \text{ MJ/h} * 238,85 \text{ kcal/MJ}}{1.160 \text{ kcal/Nm}^3} = 13.597,80 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (3)$$

O fabricante informa ainda que, para as 410 t/dia e base úmida e com base nas premissas enviadas, prevê-se uma entrada energética da ordem de 15 Gcal/h ou seja, 17,44MW para o gaseificador.

Portanto, observa-se que a potência térmica gerada pelo syngas é inferior àquela necessária para secagem do lodo nas proporções necessárias, fazendo-se necessária a complementação com combustíveis auxiliares. A Carbogás sugere a complementação com outro material, como plásticos, para gerar um blend de material a ser gaseificado, reduzindo a umidade média e aumentando a potência do combustível. Outra adequação seria reduzir mais a umidade do lodo dos atuais 80% na saída da ETE mecanicamente ou lançar mão de outra alternativa de secagem.

Não foram consideradas nesta análise o custo de aquisição ou transporte deste material complementar.

Para análise de viabilidade financeira, os custos são apresentados na tabela 14. Estes foram fornecidos pelo fabricante em caráter preliminar e representam uma ordem de grandeza. Os custos dos sistemas periféricos e acessórios foram adotados.

Tabela 14 – Estimativa de investimento da solução

Equipamento	Estimativa de Investimento	
Gaseificador 17,5 MWt	R\$	40.000.000
Conjunto Secador e Fornalha	R\$	4.000.000
Sistema de bombeamento e armazenamento, obra civil e acessórios	R\$	6.000.000
<b>Total</b>	<b>R\$</b>	<b>50.000.000</b>

E considerando-se os valores apresentados a análise de viabilidade econômica é apresentada a seguir, na tabela 15. Os valores de imposto de renda e contribuição social sobre o lucro líquido foram obtidos a partir do portal de relacionamento com investidores da Sabesp.

Tabela 145 – Análise de viabilidade econômica

Valor do Investimento:	R\$ 50.000.000	
Vida Útil:	25	anos
IR + CSLL:	34%	
Economia Anual:	R\$ 40.881.568	
Depreciação:	-R\$ 2.000.000	
LAIR:	R\$ 38.881.568	
IR + CSLL:	-R\$ 13.219.733	
Lucro Contábil:	R\$ 25.661.835	
Volta da Depreciação:	R\$ 2.000.000	
Fluxo de Caixa:	R\$ 27.661.835	

#### Avaliação

Payback Simples:	1,81	anos
Payback Decontado:	2,03	anos
VPL:	R\$ 259.656.318	
TIR:	43,74%	
VPL (Anuidade):	R\$ 243.776.767	

Como pode ser observado, o valor presente líquido do projeto é positivo e seu pay back ocorre em pouco mais de dois anos. O Weighted Average Cost of Capital - WACC, segundo a Sabesp, fica entre 8 e 9% (adotado 8,06%), bastante abaixo da TIR calculada.

Algumas questões, porém, são relevantes e não foram detalhadas neste estudo.

Deverá ser prevista uma estrutura de armazenamento para o lodo recebido, considerando-se a vazão de chegada e o consumo de lodo pela planta de gaseificação, bem como um sistema de bombeamento para esta alimentação. Os custos dessas estruturas e eventuais periféricos foi estimado em R\$ 6 mi porém é necessário que seja realizado um ante projeto para se obter um custo mais fidedigno.

Não foram considerados na análise os custos operacionais e de manutenção da planta de gaseificação. Outra análise possível é a avaliação do impacto da alteração para três turnos, isto é, operação da planta por 24 horas diárias do sistema em seu dimensionamento e custos.

Outra avaliação pertinente é a complementação do combustível com outras fontes de biomassa, como resíduos de poda que poderiam ser obtidas com as prefeituras locais, gerando receita adicional e a monetização dos créditos de carbono obtidos pela redução da disposição de lodo em aterros.

#### 4. CONCLUSÕES

O projeto de uma estação de tratamento de esgoto deve ser elaborado de forma multidisciplinar, considerando diversos aspectos técnicos, sociais e ambientais, incluindo o gerenciamento de lodo. Contudo, observa-se que, comumente, uma avaliação mais detalhada é negligenciada a que se refere ao gerenciamento do lodo da estação. Desta forma, é comum que se adote a disposição em aterro sanitário como padrão e que, iniciativas diferentes desta, fiquem mais no campo da experimentação do que da realidade.

Como foi demonstrado, o Brasil, apesar de uma matriz energética invejável internacionalmente, do ponto de vista da sustentabilidade, apresenta uma situação precária em seu saneamento básico. O Marco Legal traz luz a este necessário debate e propõe mecanismos para elevar o nível de investimentos no setor. Verifica-se, porém, que questões técnicas complexas irão surgir caso o Brasil avance na expansão do saneamento como se espera. Uma destas questões é, justamente, a disposição do lodo em aterros sanitários. Outro aspecto também relevante é a quantidade de energia demandada pelo setor. O questionamento “haverá energia elétrica suficiente para levar saneamento a todo país?” infelizmente permanece como um ponto de atenção.

O lodo constitui resíduo relevante que, a depender de suas características, pode ser utilizado na agricultura como adubo, construção civil, para geração de biogás/biometano, geração de gás de síntese entre outros. Atualmente o Brasil descarta volumes enormes deste material com vasta gama de oportunidades de aproveitamento em aterros, aumento a geração de gases do efeito estufa, seja na disposição, seja no transporte do material.

O processamento térmico do lodo mostrou-se como alternativa viável para o reaproveitamento energético do resíduo, reduzindo substancialmente o custo operacional de uma estação de tratamento de esgoto.

Por meio da análise da literatura disponível conclui-se que a gaseificação é uma alternativa viável e em estágio de tecnologia suficiente para seu emprego como solução para o setor, com potencial para redução na geração de resíduos sólidos. O poder calorífico do lodo pode não ser suficiente para sua secagem nas

proporções necessárias e deve-se avaliar a melhoria da secagem do material ainda na ETE por meio de processos mecânicos ou ainda outras alternativas térmicas complementares, como uso de energia solar por exemplo. Outra possibilidade é a suplementação do lodo com outros combustíveis derivados de resíduos como resíduo de podas, plásticos entre outros que poderiam ser obtidos com baixo custo ou até, eventualmente, gerar receita adicional para o empreendimento.

Uma das limitações deste estudo é a utilização de características físicas e composição química de um lodo com base em literatura e não a partir da caracterização do lodo das quatro estações observadas. Outro ponto relevante é a investigação de métodos para secagem, comparação de viabilidade entre a melhoria da secagem mecânica antes do início dos processos térmicos ou a complementação com outras fontes combustíveis para aumentar a energia entregue ao processo de secagem e quais fontes seriam mais viáveis; apesar do trabalho propor alternativas não foi verificado quantidade de material e custos envolvidos e não foi realizada uma análise energética.

Como melhorias propostas para desdobramento deste estudo sugere-se:

- Coleta e análise laboratorial do lodo das quatro estações em questão para caracterização;
- Detalhamento dos custos de implantação, operação e manutenção da solução e seus periféricos;
- Elaboração de um anteprojeto para avaliação de área necessária e configuração básica;
- Análise de alternativas para complementação do lodo como combustível;
- Verificação de estratégias para melhor secagem do lodo antes da entrada no sistema;

Ainda, em complementação, estudos futuros poderiam examinar e elaborar série histórica com as características do lodo das ETEs verificando sua variabilidade, uma vez que porpõem-se grande investimento com base nessa informação. Outra

alternativa é a verificação de um sistema complementar de secagem utilizando-se energia solar, por exemplo, a fim de dispensar ou amenizar os gastos de energia elétrica com centrífugas. Um terceiro ponto relevante é a investigação da biomassa complementar adequada para complementação do lodo como combustível, caso sua caracterização confirme tal necessidade.

## 5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Assis, I. F. - **EFICIÊNCIA DE UMA ESTAÇÃO COMPACTA DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMPOSTA POR REATOR UASB SEGUIDO DE BIOFILTRO AERADO SUBMERSO**, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984) **APRESENTAÇÃO DE PROJETOS DE ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS URBANOS** – Procedimento, NBR 8.419. Rio de Janeiro: ABNT.

ABRELPE, **PANORAMA\_ABRELPE\_2022, PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2022**. Disponível em < <https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em 30 de agosto de 2023.

Batistella, L. - **AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS GERADAS NA COMBUSTÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO EM COMBUSTOR DE LEITO MÓVEL**, Florianópolis - SC 2015 - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Silva, J. O. – **CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DO DMAE – UBERALÂNDIA** – MG, 2011

Borba, P. F. S. et. al. **EMIÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA DE UM ATERRO SANITÁRIO NO RIO DE JANEIRO** - Greenhouse gases emissions from a landfill in Rio de Janeiro, Priscila Falcão de Sá Borba<sup>1</sup> , Eduardo Monteiro Martins<sup>2</sup> , Sergio Machado Correa<sup>3</sup> , Elisabeth Ritter<sup>4</sup>, 2018

CARVALHAES, Vinícius. **ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA CONVERSÃO EM PROCESSOS TERMOQUÍMICOS DE GASEIFICAÇÃO**. Universidade de Brasília – Título: Mestrado em Ciências Mecânicas. Brasília, 2013.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – **CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM 2022** -Disponível em <<https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/consumo-brasileiro-de-energia-eletrica-subiu-1-5-em-2022-mostra-balanco-dazcee#:~:text=O%20consumo%20de%20energia%20el%C3%A9trica,pela%20pandemia%20de%20COVID%2D19>>. Acessado em 12 de outubro de 2022.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo- **PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA EMISSÕES DE METANO NO TRATAMENTO E NA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS** – CETESB 2006

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – **GASES DO EFEITO ESTUFA – CO<sub>2</sub>** Disponível em < <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/#:~:text=CO2%20%E2%80%93%20Respons%C3%A1vel%20por%20cerca%20de,e%20sumidouros%2C%20que%20tem%20a>> Acessado em 12 de outubro de 2023.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **CONTRIBUIÇÃO PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE ETES EM PROCESSOS TÉRMICOS**. Revista DAE, volume 63 – páginas 55 a 88. Disponível em <<http://revistadae.com.br/downloads/edicoes/Revista-DAE-198.pdf#page=55>>. Acessado em 19 de agosto de 2023.

CHERNICHARO, C.A.L. **ANAEROBIC REACTORS. CAPÍTULO 1 IN.: INTRODUCTION TO ANAEROBIC TRATMENT**. IWA Publishing, London, New York, p. 1-2, 2007a.

CHERNICHARO, C.A.L. **ANAEROBIC REACTORS. CAPÍTULO 2 IN.: PRINCIPLES OF ANAEROBIC DIGESTION**. IWA Publishing, London, New York, p. 5-23, 2007b.

CHERNICHARO, C.A.L.; FLORENCIO, L.; BASTOS, R.K.X.; PIVELI, R.P.; SPERLING, M.V.; MONTEGGIA, L.O. **TRATAMENTO E UTILIZAÇÃO DE ESGOTOS SANITÁRIOS**. Capítulo 3 In.: Tratamento de esgotos e produção de efluentes adequados a diversas modalidades de reuso da água. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, RJ. ABES, p. 63-110, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. **REATORES ANAERÓBIOS**. Editora UFMG, 2016

CHERNICHARO, C. A. L. **PÓS TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAEROBICOS: ASPECTOS METODOLOGICOS - Vol.1**, Editora UFMG, 2001

CHERNICHARO, C. A. L. **PÓS TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAEROBICOS Vol.2**, Editora UFMG, 2001

COMPONENTE, **CATÁLOGO DE FORNALHAS E QUEIMADORES DE BIOMASSA** – Disponível em <[https://materiais.componente.com.br/catalogo-fornalhas-e-queimadores-de-iomassa?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwhfipBhCqARIsAH9msbltz5qNmz3icOmtXKa1pHoOSb5SjKkpMr7E8iix2wl9vgSDEkzNEaAsRpEALw\\_wcB#rd-box-joq3m2vv](https://materiais.componente.com.br/catalogo-fornalhas-e-queimadores-de-iomassa?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwhfipBhCqARIsAH9msbltz5qNmz3icOmtXKa1pHoOSb5SjKkpMr7E8iix2wl9vgSDEkzNEaAsRpEALw_wcB#rd-box-joq3m2vv)>. Acessado em 29 de outubro de 2023.

Cubi Energia – **OFERTA INTERNA DE ENERGIA (OIE)** - Disponível em <<https://www.cubienergia.com/errando-o-alvo/>> Acessado em 30 de setembro de 2023

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **TERMODINÂMICA**. Tradução: Paulo Maurício Costa Gomes; revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **LODO DE ESGOTO É ÓTIMO ADUBO PARA REFLORESTAMENTO** – Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44370852/lodo-de-esgoto-e-otimo-adubo-para-eflorestamento#:~:text=Atualmente%2C%20s%C3%A3o%20geradas%20cerca%20de,desperdi%C3%A7%C3%A3o%20seu%20potencial%20como%20fertilizante>>. Acessado em 14 de outubro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética – **PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2032 - GERAÇÃO CENTRALIZADA DE ENERGIA ELÉTRICA - REQUISITOS DE ENERGIA E POTÊNCIA.** Disponível em <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE2032\\_CadernoRequisitos\\_site\\_rev2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE2032_CadernoRequisitos_site_rev2.pdf)> Acessado em 07 de julho de 2023

EPE – Empresa de Pesquisa Energética – **MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA.** Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acessado em 29 de setembro de 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética – **BEN, RELATÓRIO SÍNTESE 2023 – DISPONÍVEL EM** <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/planejamento-energetico-e-a-zpe#:~:text=%22N%C3%A3o%20energ%C3%A9tico%22%20considera%20o%20consumo,de%20fertilizantes%20para%20a%20agricultura>> Acessado em 12 de outubro de 2023.

EUROPA - **PURIFICADOR DE ÁGUA GELADA: QUAL A TEMPERATURA E QUANTO TEMPO PARA GELAR?** – Disponível em <<https://www.europa.com.br/blog/purificador-temperatura-agua/>>. Acessado em 29 de outubro de 2023.

FEMA (Fundação Estadual do Meio Ambiente). **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: GUIA DE ORIENTAÇÃO PARA GOVERNOS MUNICIPAIS DE MINAS GERAIS.** Belo Horizonte, 2012.

Gomes, Lídia de Assis. **APROVEITAMENTO DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E A RELAÇÃO COM O MEIO AMBIENTE** – 2019. 1 recurso online (37 f. : il., color.) : pdf.

IBGE. (2020). **PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO: PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO 2017: ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO,** Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro.

IMAFLORA - Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola – **BRASIL ESTA SE DISTANCIANDO DAS METAS DA POLITICA NACIONAL SOBRE MUDANCA DO CLIMA E DO ACORDO DE PARIS** – Disponível em <<https://www.imaflora.org/noticia/cop27-brasil-esta-se-distanciando-das-metas-da-politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima-e-do-acordo-de-paris>>. Acessado em 14 de outubro de 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – **PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO** – Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/53/49645?ano=2033tipo=grafico&indicador=49645>>. Acessado em 25 de agosto de 2023.

Instituto Trata Brasil – **BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA EXPANSÃO DO SANEAMENTO NO BRASIL** Novembro de 2022. Disponível em

<[https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Press-Release\\_-\\_ITB-Beneficios-Economicos-com-a-Expansao-do-Saneamento.pdf](https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Press-Release_-_ITB-Beneficios-Economicos-com-a-Expansao-do-Saneamento.pdf)> Acessado em 13 de Outubro de 2023.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, **RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: DESAFIOS TECNOLÓGICOS, POLÍTICOS E ECONÔMICOS**, Disponível em <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>> Acessado em 27 de agosto de 2008.

JORDÃO, E. P. e PESSOA, C. A. **TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS** – 7ª Edição, 2014.

Junior, Rudinei T; Saiani, Carlos C. Santejo; Dourado, Juscelino. **RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA LEI FEDERAL Nº 12.305** (lei De Resíduos Sólidos). Editora: Manole. 456 p. 2013.

JÚNIOR, A. T. F. **ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NUMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

Kaza, S.; Yao, L. C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van W., Frank 2018 **WHAT A WASTE 2.0: A GLOBAL SNAPSHOT OF SOLID WASTE MANAGEMENT TO 2050. URBAN DEVELOPMENT**; © Washington, DC: World Disponível em <<http://hdl.handle.net/10986/30317> License: CC BY 3.0 IGO.” Disponível em [Http://Hdl.Handle.Net/10986/30317](http://Hdl.Handle.Net/10986/30317)>. Acessado em 27 de agosto de 2023.

KPMG e ABCON. **QUANTO CUSTA UNIVERSALIZAR O SANEAMENTO NO BRASIL?**, KPMG Consultoria Ltda e Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto – ABCON, 2020.

Krahembuhl, C. B. B. P., **EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA DISPOSIÇÃO FINAL DE LODO DE ESGOTO** - Campinas, 2021. 65fls.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. **TOWARDS SEWAGE SLUDGE BASED BIOFUELS VIA THERMOCHEMICAL CONVERSION – A REVIEW**. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional – **PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO (PLANSAB)**, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional – **PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO (PLANSAB), 2020. RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO ANUAL 2020** – Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/2RELATRIODEAVALIAOANUALDOPLANSAB2020.pdf>>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

MIRANDA, L. H. T. F. **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE ITANHAÉM-SP.** Universidade de São Paulo - Escola Politécnica. São Paulo, 2014.

Moraes, Luciana de Mattos. **AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE ANAERÓBIA DE LODOS DE ESGOTO PROVENIENTES DE REATORES ANAERÓBIOS SEQUENCIAIS** / Luciana de Mattos Moraes.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

MOREIRA, J. R. S. et al **ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.** 2ª Edição. Universidade de São Paulo - Escola Politécnica. São Paulo, 2021.

MS – Ministério da Saúde – **DATA SUS.** Disponível em <<https://datasus.saude.gov.br/>> Acessado em 22 de agosto de 2023.

OMS – **ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE.** Disponível em <<https://www.who.int/>>. Acessado em 26 de agosto de 2023.

PEDROZA, J.P.; BELTRÃO, N.E.M; HAANDEL, A.C.V.; GOUVEIA, J.P.G.; LEITE, J.C.A. **DOSES CRESCENTES DE BIODOSSÍLIDOS E SEUS EFEITOS NA PRODUÇÃO E COMPONENTES DO ALGODOEIRO HERBÁCEO.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 5, n. 2, p. 1519-5228, 2005

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G.E.G.; SOUSA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M.; MILHOMEN, C.C. **PRODUÇÃO E TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO - UMA REVISÃO.** Revista Liberato, v. 11, n. 16, p. 89-188, 2010.

Ponce, F. A. M. Ponce, Rollemberg, S : **APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE PARA AVALIAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO – 2019**

SANEFLUX – **REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE** – Disponível em <<https://www.gruposaneflux.com.br/reator-anaerobio-fluxo-ascendente>> Acessado em 14 de outubro de 2023.

SILVA, J. O. **CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO DMAE-UBERLÂNDIA-MG.** Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SNIS – Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento – **DIAGNÓSTICO TEMÁTICO – SERVIÇO DE ÁGUA E ESGOTO – ANO REFERÊNCIA 2020 – 2022** Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

SOARES, Daniel H. **GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA DE MÉDIO E GRANDE PORTE PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE: UMA ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL NO MUNDO.** Programa de Educação Continuada da Universidade de São Paulo; Título: Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. São Paulo, 2012.

SNIS – Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento – **PAINEL DE INDICADORES**, 2022. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 04 de julho de 2022.

SNIS – Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento –. **ESGOTAMENTO SANITÁRIO 2021**. Disponível em <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/es>>. Acessado em 22 de agosto de 2023.

SPERLING, M. **PRINCÍPIOS BÁSICOS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS** – 2016 – Editora UFMG.

SPINOSA L.; AYOL A.; BAUDEZ J. C.; CANZIANI R.; JENICEK P.; LEONARD A.; **SUSTAINABLE AND INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEWAGE SLUDGE MANAGEMENT**. Water 2011. v.3, p.702-717, 2011.

UNICEF - **FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA**. Disponível em < [www.help.unicef.org](http://www.help.unicef.org)>. Acessado em 26 de agosto de 2023.

USP – Universidade de São Paulo – **BRASIL APARECE ENTRE OS PAISES QUE MAIS CONSOMEM ENERGIA**. Disponível em <[Vulcan Drying Systems – \*\*BIOSOLIDS DRYERS\*\* - Disponível em <<https://vulcandryingsystems.com/biosolids-dryers/>>. Acessado em 29 de outubro de 2023.](https://jornal.usp.br/noticias/serie-energia-brasil-aparece-entre-os-paises-que-mais-consomem-energia/#:~:te xt=No%20ano%20de%202022%2C%20o,da%20%C3%8Dndia%2C%20com%20936%20kWh. > https://jornal.usp.br/noticias/serie-energia-brasil-aparece-entre-os-paises-que-mais-consomem-energia/#:~:te xt=No%20ano%20de%202022%2C%20o,da%20%C3%8Dndia%2C%20com%20936%20kWh. > Acessado em 13 de outubro de 2023.</p></div><div data-bbox=)

YANG, N.; DAMGAARD, A.; LÜ, F.; SHAO, L.M.; BROGAARD, L.K.S.; HE, P.J. (2014) **ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT ON THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE SANITARY LANDFILLS IN DEVELOPING COUNTRIES: CHINA CASE STUDY**. Waste Management, v. 34, n. 5, p. 929-937.