

FUNDAÇÃO ESCOLA DE SOCIOLOGIA E POLÍTICA DE SÃO PAULO ESCOLA
PÓS-GRADUADA DE CIÊNCIAS SOCIAIS
Curso de Especialização – lato sensu: Gestão Ambiental

MONICA RICCITELLI

GESTÃO EFICIENTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE GRANDE PORTE

SÃO PAULO

2021

Monica Riccitelli

GESTÃO EFICIENTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE GRANDE PORTE

Monografia apresentada à FESPSP -
Fundação Escola de Sociologia e Política
de São Paulo, como exigência parcial
para obtenção do título de Master in
Business Administration em Saneamento
Ambiental, sob a orientação da
Professora Tathiana Chicarino

São Paulo

2021

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca FESPSP

628.44

R493g Riccitelli, Monica.

Gestão eficiente dos resíduos sólidos gerados em estações de tratamento de grande porte / Monica Riccitelli. – 2021.

35 p. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Professora Dra. Tathiana Chicarino.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização: *Master in Business Administration* em Saneamento Ambiental) – Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo.

Bibliografia: p. 33-35.

1. Resíduos sólidos. 2. Lodo de ETE. 3. Tratamento de esgoto. 4. Aproveitamento energético. 5. Gestão resíduos sólidos. 6. Disposição final. I. Chicarino, Tathiana. II. Título.

CDD 23.: Resíduos sólidos – Tratamento 628.44

Elaborada por Éderson Ferreira Crispim CRB-8/9724

Monica Riccitelli

GESTÃO EFICIENTE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE GRANDE PORTE

Monografia apresentada à FESPSP - Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de Master in Business Administration em Saneamento Ambiental, sob a orientação da Professora Tathiana Chicarino

Data de aprovação:

_____/_____/_____.

Banca examinadora:

Nome do (a) professor (a), titulação,

Instituição e assinatura.

Nome do (a) professor (a), titulação,

Instituição e assinatura.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professora Tathiana Chicarino, pela correção e orientação rígida e capaz, que me desafiou e impulsionou a dar o melhor para a execução desse trabalho. Agradeço à Rosmeiry Vanzella Vicente e Eduardo Pereira de Aragão, pelo suporte na identificação de fontes de inúmeros dados e informações requeridas no trabalho. Agradeço ao engenheiro Nivaldo Rodrigues da Costa Jr, que com seu exemplo nos motiva sempre na busca da excelência, autorizando e incentivando a execução desse curso, e contribuindo para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço minha família, meus filhos Giovanna e Guilherme, meu pai Aldo, meu irmão Arnaldo, que são minha base e minha inspiração, que nesses tempos difíceis de pandemia e isolamento social, me apoiaram continuamente para a realização desse árduo trabalho. Um especial agradecimento a minha mãe, Dilza, que mesmo não estando mais fisicamente ao meu lado, transbordou sempre amor em nossa relação, que até hoje me aquece o coração e a alma. Agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação e desenvolvimento. E, agradeço a Deus, pela minha vida, saúde e forças para superar esse e todos os demais desafios.

RESUMO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305/2010 e regulamentada pela Portaria 274/2019, estabeleceu metas e objetivos para pessoas físicas e jurídicas relacionados ao gerenciamento de resíduos, com os seguintes propósitos: adequar o gerenciamento de resíduos às legislações e normativas existentes, preservação ambiental com a redução do uso de aterros e a logística reversa de resíduos pós consumo. Ela representou um importante instrumento para cobrança e avanço dos projetos necessários para elevar o patamar do Brasil quanto ao uso responsável, sustentável e racional dos resíduos sólidos.

Dentro dessa lógica, o presente trabalho pretende levantar as principais fontes de energia presentes nos sub-produtos gerados no tratamento de esgoto, em plantas de grande porte. E, apresentar estudos de balanço energético envolvendo a quantidade de energia produzida pelo tratamento do lodo e do gás, bem como, alternativas de destinação e reaproveitamento dos resíduos.

Essas informações organizadas, darão um *dashboard* para o setor, que servirá de base para estudos bastante abrangentes, relacionados a gestão de resíduos sólidos em grande escala.

Palavra-chave: Resíduos Sólidos. Lodo de ETE. Tratamento de Esgoto. Aproveitamento Energético. Gestão Resíduos Sólidos. Disposição Final

ABSTRACT

The National Solid Waste Policy, instituted by Law 12.305/2010 and regulated by Ordinance 274/2019, established goals and objectives for individuals and companies related to waste management with the following purposes:

- a) Adapting waste management to existing laws and regulations
- b) Environmental preservation reducing the use of landfills
- c) Reverse logistics of post-consumer waste.

It represented an important instrument for charging and advancing the necessary projects to raise the bar in Brazil regarding the responsible, sustainable and rational use of solid waste.

This work intends to survey main byproducts energy sources generated in sewage treatment, based on large sewage treatment plants, and also present balance studies involving the energy produced by the treatment of sludge and gas, as well as alternatives regarding reuse of waste and its destination.

Once organized this information will provide a dashboard for the sector, which will serve as basis for quite comprehensive studies related to large-scale solid waste management.

Keywords: Solid Waste. Sludge Plant. Wastewater Treatment. Energy Used. Solid Waste Management. Final Disposition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma ETE – Lodos ativados Convencionalpág 17
Figura 2 – Divisão dos custos com Energia Elétrica em uma ETE por Lodos ativados convencionalpág 19
Figura 3 – Tratamento e Purificação do Biogáspág 22
Figura 4 - Custos de março de 2020 da tarifa convencional para as principais distribuidoras do Brasilpág 26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos processos térmicospág 28
para lodos de ETEs

Quadro 2 - Análise comparativa das principaispág 29
alternativas de tratamento térmico para lodo de ETE
- balanço de vantagens e desvantagens

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados a partir de Balanço de Massa-comparação aquecimento dos digestores anaeróbiospág 20
Tabela 2 - Composição Biogáspág 22
Tabela 3 - Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás de tratamento de esgoto, utilizando uma microturbina de 30 kWpág 23
Tabela 4 - Comparação de custos de disposição finalpág 24
Tabela 5 - Custo Energia Entregue (R\$/MWh)pág 25

LISTA DE ABREVIATURAS

Kcal/kg	Quilocalorias por quilo
L/s	Litros por segundo
m ³ /d	Metros cúbicos por dia
mg/L	Miligramas por litro
MJ/kg	Mega Jaule por quilo
MWh	Megawatt-hora (MWh)
Nm ³ /d	Normal metros cúbicos por dia (expressa vazões de gases)
Pág.	Página
Prof.	Professor
Prof. ^a	Professora

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CIP	Catálogo-na-publicação
ESP	Escola de Sociologia e Política
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FESPSP	Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
HCL	Ácido Clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
H ₂ S	Gás Sulfídrico
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N ₂	Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
PCI	Poder Calorífico Inferior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SO _x	Óxidos de Enxofre (SO _x)
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RSO	Resíduos sólidos orgânicos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
VOCs	Volatile Organic Compound. Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVO.....	15
2.1. objetivos específicos.....	16
3. CONCEITOS BÁSICOS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	17
3.1. O Processamento do Lodo nas ETEs.....	18
3.2. Consumo de energia elétrica em ETEs.....	20
3.3. Análise quanto à operação dos Digestores Anaeróbios.....	20
3.4. Geração de Biogás.....	21
4. FORMAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DESAGUADO.....	24
4.1. Aterros Sanitários.....	24
4.2. WTE - Waste-to-Energy.....	25
4.3. Processos térmicos.....	27
5. CASES REAIS DE USO DO LODO E DO BIOGÁS...	30
6. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305/2010 e regulamentada pela Portaria 274/2019, estabeleceu metas e objetivos para pessoas físicas e jurídicas relacionados ao gerenciamento de resíduos, com os seguintes propósitos: adequar o gerenciamento de resíduos às legislações e normativas existentes, preservação ambiental com a redução do uso de aterros e a logística reversa de resíduos pós consumo. Ela representou um importante instrumento para cobrança e avanço dos projetos necessários para elevar o patamar do Brasil quanto ao uso responsável, sustentável e racional dos resíduos sólidos.

A gestão adequada desses resíduos vem se tornando preocupação crescente na Sociedade moderna. Embora tenha ocorrido um significativo avanço nas últimas décadas, principalmente nos países mais desenvolvidos, com respeito à redução da geração dos RSO, reciclagem de materiais, na busca de sistemas de tratamento mais eficientes, bem como na disposição segura dos RSO em termos ambientais e de saúde pública, a solução para os problemas advindos desses rejeitos constitui ainda um dos maiores desafios da humanidade para o século XXI.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a precariedade da prestação dos serviços de saneamento em alguns municípios, reflete diretamente na gestão dos resíduos sólidos gerados.

Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES (2019), o índice de cobertura de coleta de esgotos do País é da ordem de 59,90%, e apenas 48,10% é destinado a algum tipo de tratamento. Quanto a destinação adequada dos resíduos sólidos, apenas 58,61% dos municípios o fazem, e dos municípios considerados de grande porte, apenas 3,29% deles tem uma destinação adequada de seus resíduos.

Lembrando que, os sólidos presentes no esgoto contêm todos os poluentes oriundos das atividades, dos hábitos alimentares e do nível de saúde da população atendida pelas redes coletoras de esgotos ou por sistemas individuais, retratando exatamente as características dessa comunidade.

Na atual conjuntura a decisão do que fazer com esses resíduos tem variáveis, como:

- A meta de redução de aterramento a ser planejada como exige a nova Lei

- A busca de tecnologias de reciclagem para produção de insumos e/ou energia
- A necessidade de atingir metas econômicas rigorosas na implantação e operação de infraestruturas particularmente dispendiosas

Para avançar nesse terreno podem caber várias soluções, tais como:

- Implantação de novas infraestruturas em módulos de forma a permitir absorção de novas tecnologias emergentes
- Maximização da produção de energia elétrica gerada tendo como insumo biogás e incineração/ gaseificação de sólidos

A busca de independência energética para as ETEs fica assim estabelecida como objetivo permanente, o que implica dizer que os crescentes consumos e custos de energia em tratamento são inevitáveis e devem ser prevenidos desde a fase de planejamento.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é trazer informações organizadas e representativas de ETEs de grande porte, que tratam esgoto proveniente de áreas urbanas, com altas concentrações de indústrias e comércio.

O tratamento de esgoto na Região Metropolitana de São Paulo, segundo a Sabesp, gera hoje como subproduto, aproximadamente 800 toneladas por dia de resíduos sólidos, classificados pela NBR 10004 como classe II-A. Esses resíduos têm como destino, aterros sanitários localizados nas franjas desse centro urbano, onde são co-dispostos com lixo urbano.

Apesar dessa Disposição estar adequada em termos legais e ambientais, a mesma não traz ganhos ambientais.

2.1. Objetivos específicos

Apresentar estudo de balanço energético envolvendo a quantidade de energia produzida pelo tratamento do lodo e do gás. Desse modo, a ETE pode ser autossustentável energeticamente, possuindo baixo índice poluidor, já que seus próprios resíduos (subprodutos do tratamento de esgoto) servem como fonte energética.

Essas informações organizadas, darão um *dashboard* para o setor, que servirá de base para estudos bastante abrangentes, relacionados a gestão de resíduos sólidos em grande escala.

Além disso, pretende-se exemplificar as oportunidades de redução dos custos operacionais com a redução dos volumes e consequente redução dos custos de transporte e destinação final.

Pensando na logística de destinação desses resíduos, a geração de energia local reduz os volumes dos resíduos para Disposição final em aterro. Segundo Pinheiro (2017), podemos considerar variações de custo entre R\$ 99-225/ton para o Rio de Janeiro. Ratificando esse número, para São Paulo, segundo Sabesp (2021), podemos considerar de forma conservadora R\$200/ton.

Segundo Pinto e Szczupak (2020), a energia gerada a partir de resíduos não é apenas uma resposta à necessidade de tratamento de um volume cada vez maior de detritos. Ao contrário, oferece uma série de benefícios à sociedade que, se devidamente computados, colocam a fonte como uma importante alternativa de geração em um país cada vez mais exposto à vulnerabilidade climatológica e à necessidade de utilização de térmicas caras e poluentes.

Pinto e Szczupak (2020), colocam também, que são necessárias, em média, duas toneladas de resíduos para gerar 1 MWh, portando, a estimativa do custo evitado de disposição final em aterro de resíduos é igual a R\$400/MWh.

Esses números dão uma ordem de grandeza do potencial existente para recuperação de energia no tratamento e disposição final do esgoto, atrelados a redução dos custos com transporte e aterro.

Os principais destinos para o lodo e para o gás, que serão abordados serão:

- Secagem térmica

- Gaseificação
- Cogeração
- Aterro sanitário

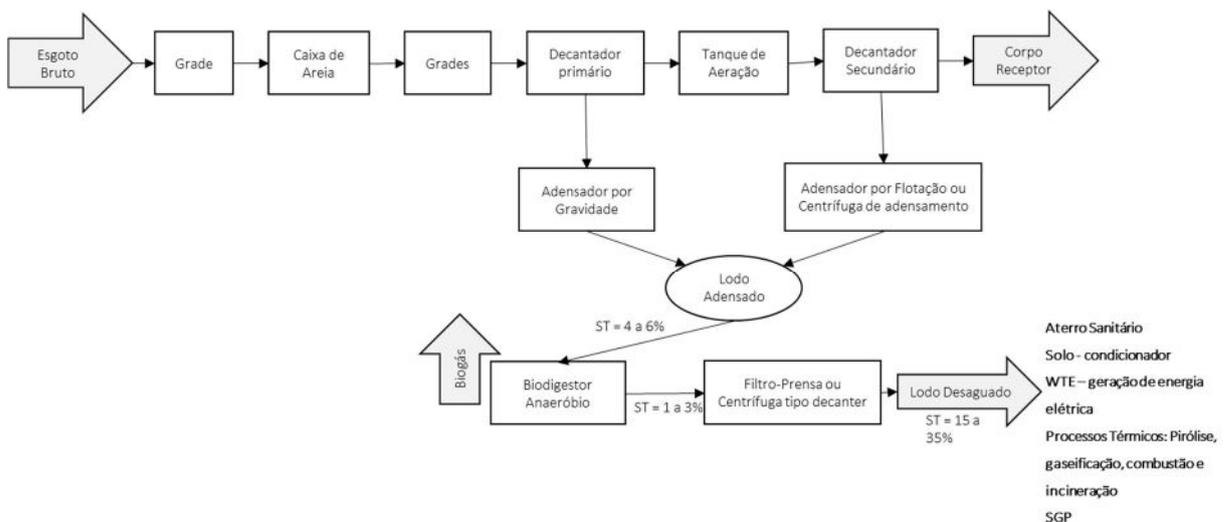
3. CONCEITOS BÁSICOS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS

As ETEs, normalmente tem em seu processo preliminar, a remoção de sólidos grosseiros, chamados de material gradeado e areia, esses materiais representam em média 1 a 2% do volume total de resíduos sólidos, considerando até a fase de desaguamento de lodo.

Existem diversos estudos e experimentos para a utilização dessa areia na fabricação de tijolos, vasos, ou mesmo na construção civil. Porém, sendo o volume e carga orgânica desses resíduos significativamente menor que o lodo desaguado, este estudo vai focar no aproveitamento energético do lodo e do biogás.

A Figura abaixo apresenta um esquemático de uma ETE com processo por lodos ativados convencional. E, de forma simplificada, quais os subprodutos gerados e sua destinação final.

Figura 1 - Fluxograma ETE – Lodos ativados Convencional



Fonte: Desenvolvido pelo autor

3.1. O Processamento do Lodo nas ETEs

Os sistemas existentes para tratamento do lodo podem ser divididos em dois tipos:

Processos mecânicos e físicos para redução do teor de água livre presente no lodo

Adensamento por flotação
Adensamento por gravidade
Adensamento por centrífugas
Desaguamento por centrífugas
Desaguamento por Filtros prensa

Processos Biológicos e químicos para estabilização

Estabilização biológica em biodigestores anaeróbios
Estabilização Química

A aplicação e operação corretas dessas etapas tem consequências diretas na qualidade e volume de lodo gerado. E serão importantes para avaliação do potencial energético e alternativas de disposição final.

Quando falamos em qualidade, a avaliação refere-se principalmente ao Teor de sólidos presente no lodo, aos patógenos e metais pesados.

A Digestão anaeróbia eficiente do lodo (mistura e aquecimento adequados), não apenas gera maior quantidade de biogás, como facilita o processo subsequente de desaguamento, e reduz significativamente os patógenos presentes no lodo.

Estamos falando de redução nos custos com produtos químicos na etapa de desaguamento, aumento da vida útil dos insumos (ex: telas filtrantes), e, em viabilizar alternativas sustentáveis de disposição final.

A disposição final de lodos é uma parte crescente dos custos de funcionamento das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). O uso de digestores anaeróbios, foi implementado em todo mundo para reduzir o volume e estabilizar o lodo, e gerar o biogás.

Para uma ordem de grandeza, segundo Relatórios operacionais Sabesp, o lodo desaguado produzido nas ETEs, com DQO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) do

esgoto Bruto na ordem de 550 mg/L, o PCI (Poder Calorífico Inferior) do lodo é a ordem de:

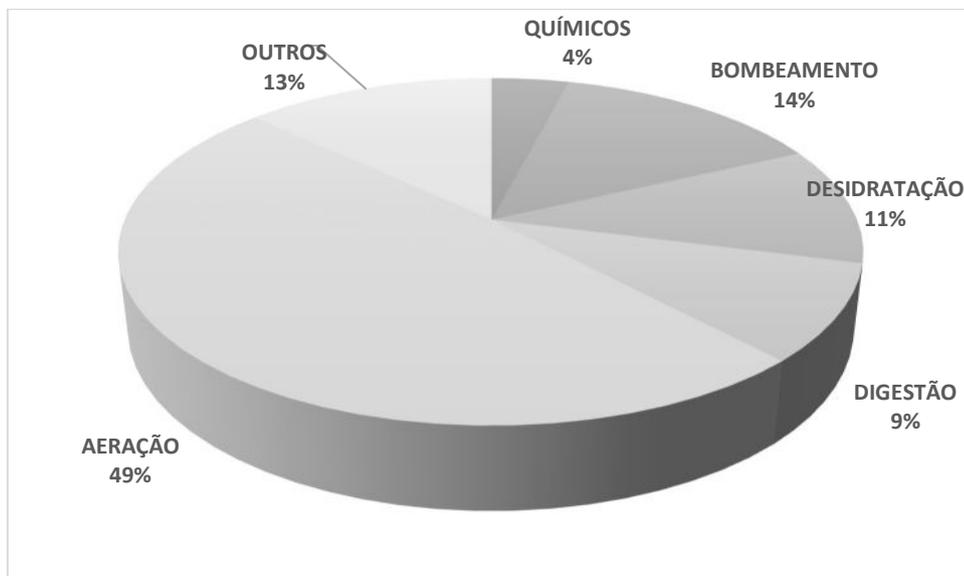
Teor de Sólidos do Lodo Desaguado de 30% PCI = 2.800 Kcal/Kg

Teor de Sólidos do Lodo Seco de 80% PCI = 3.200 Kcal/Kg

3.2. Consumo de energia elétrica em ETEs

Para uma ordem de grandeza da divisão do consumo/custos com energia elétrica nas ETEs, a Figura a seguir apresenta informações médias a respeito do tema.

Figura 2 – Divisão dos custos com Energia Elétrica em uma ETE por Lodos ativados convencional.



Fonte: Rosso and Stenstorom (2005)

Em uma estação por Lodos Ativados, o maior consumo de energia elétrica está associado à aeração no processo biológico aeróbio.

3.3. Análise quanto à operação dos Digestores Anaeróbios

Essa etapa do processo impacta na matriz de produção energética da ETE, como exemplificado a seguir.

Supondo:

- Vazão Média afluyente: 1.250 L/s
- DQO Afluyente = 500 mg/L
- Remoção de DQO na decantação primária = 35%
- Remoção de DQO no Tanques de Aeração + Decantadores Secundários = 85%

Resultado esperado com aquecimento dos digestores ~ 37°C, e, sem o aquecimento dos digestores.

Tabela 1 – Dados a partir de Balanço de Massa- comparação aquecimento dos digestores anaeróbios

	Produção de Lodo (ton/d)	Biogás Produzido (Nm³/d)
Com aquecimento dos digestores	55	4.130
Sem aquecimento dos digestores	69	2.548

Fonte: Balanço de Massa feito pelo Autor, a partir de Síntese de Informações Operacionais dos Sistemas de Tratamento de Esgotos da RMSP – 2010 a 2021. Unidade de Negócio de Tratamento de Esgotos, 2021.

Observa-se que:

Com o aquecimento dos digestores haverá uma redução de 25% no volume final de lodo desaguado. Isso representa redução nos custos de produtos químicos para desaguamento e no custo final de transporte e disposição do lodo.

O aquecimento aumenta ainda 38% a produção de biogás.

Porém, é necessário considerar que, como o aquecimento dos digestores é feito com o próprio biogás produzido, e para isso, é necessário utilizar 1.540 Nm³/d, ou 37% do volume de biogás produzido. Dependendo de qual alternativa se deseja utilizar para geração de energia, esse balanço deve ser cuidadosamente avaliado. Considerando inclusive fontes externas de energia.

3.4. Geração de Biogás

O biogás possui elevado potencial de geração de energia. O gás metano produzido (CH_4), quando liberado diretamente na atmosfera, agrava o efeito estufa, já que é 21 vezes mais impactante do que o dióxido de carbono (CO_2).

Nas ETEs, parte do biogás produzido, é queimado em uma caldeira para aquecimento dos digestores e outra parte é injetado no interior dos tanques para promover a mistura do lodo. O Biogás excedente é queimado em “flare” ou “queimador”, para reduzir os impactos ambientais provenientes das emissões dos gases.

A alternativa para a queima em “flare” é a conversão do biogás em energia elétrica através da queima em motores e turbinas a gás. Mais recentemente, surge a opção por microturbinas, já em uso nos Estados Unidos, pela Capstone.

Segundo Noyola (2006), a composição do biogás é variável, dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica a ser digerida, das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato.

Segundo Noyola (2006), o biogás de reatores que tratam esgoto doméstico apresenta uma composição de metano de 70 a 80%, nitrogênio de 10 a 25%, o que é devido a parcela de N_2 dissolvida no esgoto doméstico, e dióxido de carbono de 5 a 10%.

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), para digestão anaeróbia de esgoto doméstico, estima-se uma produção de biogás de $0,4\text{m}^3$ de CH_4 por kg de DQO removida, e, $0,75\text{m}^3$ de CH_4 por kg de SSV removida.

Lobato (2011) através do desenvolvimento de um modelo para estimativa do balanço de massa da DQO em reatores tipo RAFA, obteve valores da produção de metano na faixa de 0,11 a 0,19 m^3 de CH_4 por kg DQO removida.

O metano destaca-se por ser um gás incolor, inodoro e insolúvel, de baixa densidade.

A Tabela 2 apresenta a composição típica do biogás produzido nos processos de tratamento de esgoto, em uma Unidade de Grande porte da RMSP.

Tabela 2.- Composição Biogás

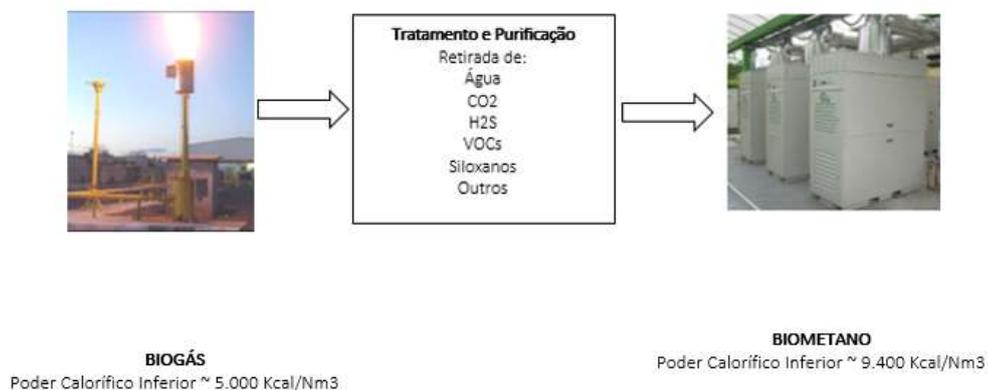
Composto	Concentração
CO ₂	30,33%
CH ₄	64,24%
N ₂	2,48%
O ₂	0,71%
H ₂ S	< 30 ppm

Fonte: SABESP. Síntese de Informações Operacionais dos Sistemas de Tratamento de Esgotos da RMSP – 2010 a 2021. Unidade de Negócio de Tratamento de Esgotos, 2021.

Importante saber que, o O₂ tem que apresentar-se em concentração $\leq 2\%$, isso para afastar risco de explosão.

Para uso do biogás normalmente são feitos processos de tratamento e purificação do biogás. Veja figura a seguir:

Figura 3 – Tratamento e Purificação do Biogás



Fonte: IEE USP – Instituto de Energia e Ambiente – Adaptado pelo autor

Quanto à vantagens associadas ao aproveitamento do biogás na cadeia energética, além de ser um combustível limpo, podemos citar:

- Reduz custos operacionais
- Pode ser uma fonte adicional de receita
- Pode ser armazenado
- Possui versatilidade de usos (térmico, elétrico, veicular)
- É uma fonte renovável
- Mitiga a emissão de gás de efeito estufa

A Sabesp firmou em 2015 um Acordo de Cooperação com o instituto alemão Fraunhofer para execução do projeto “Beneficiamento de Biogás Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto para Utilização Veicular”. A ETE do município paulista de Franca com vazão de tratamento de esgotos de 450 litros/segundo, foi a primeira da SABESP a utilizar o biogás gerado nos digestores anaeróbios para produzir biometano como combustível veicular na frota de veículo da empresa. A ETE Franca gera em torno de 2.600 Nm³ /dia de biogás nos seus digestores anaeróbios de lodo (sendo 60% de metano) e é capaz de produzir no sistema de beneficiamento de biogás até 1.700 Nm³/dia de biometano (em torno de 97% de metano), o que equivale a um potencial de substituição de 1.700 litros de gasolina comum por dia.

O Biogás pode compor a matriz energética na ETE, para geração de energia elétrica em motores e microturbinas.

A Tabela 3 abaixo apresenta estudos reais para geração de energia elétrica em microturbina tipo Capstone (30kW).

Tabela 3 – Custo dos equipamentos, materiais e acessórios para a geração de energia elétrica, a partir do biogás, utilizando uma microturbina de 30 kW

Equipamentos	Modelo	Quant.	Custo (R\$)*
Microturbina	Capstone de 30 kW a Biogás C330 1	1	R\$ 109.756,10
Compressor de Palhetas	V04G	1	R\$ 24.630,30
Secador por Refrigeração	CRD0230	1	R\$ 3.800,00
Secador por Refrigeração	CRD0055	1	R\$ 1.600,00
Filtro Coalescente	CF0036	3	R\$ 2.400,00
Filtro de Carvão Ativado	CF0036	1	R\$ 800,00
Tubulação	Aço inox	20m	R\$ 1.800,00
Válvulas esfera	Aço inox	6	R\$ 720,00
Conexões	Aço inox	7	R\$ 140,00
Tubulação de exaustão com isolamento térmico	Aço carbono	4m	R\$ 2.400,00
Obra civil	Concreto	18m ²	R\$ 3.000,00
Investimento total em equipamentos			R\$ 151.046,40

(*) Os preços acima descritos estão baseados no Dólar comercial de venda do dia 01/04/2002 (1 US\$ =2,2935 R\$) e não incluem IPI. Fonte: CENBIO, 2004

4. FORMAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DESAGUADO

4.1. Aterros Sanitários

Os resíduos sólidos segundo a NBR 14.004:2004, podem ser classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos; – resíduos classe II A – Não inertes. – Resíduos classe II B – Inertes.

Os lodos provenientes de estações de Tratamento de Esgotos, se bem operadas, e com as fontes de contribuição industrial controladas, tem sua classificação, como resíduos classe II A – Não inertes. Ou seja, tal qual os RSU, pode ser disposta em aterro licenciado para esse fim.

Uma solução para a disposição final dos gerados nas ETEs, é a co-disposição em aterro sanitário com lixo urbano.

Segundo a SABESP (2021), na RMSP, a distância entre a ETE e o aterro sanitário utilizado, pode chegar a 45 km, com um custo de transporte de R\$ 17,15 a R\$ 24,12/ton, dependendo da distância.

Importante colocar que existem critérios técnicos, quanto ao teor máximo de umidade no lodo, visando reduzir riscos na operação do aterro (comatação de drenos e deslizamento dos maciços), que são, em alguns casos um problema para as operações das ETEs, que tem dificuldades de atingir concentrações acima de 30% no lodo desaguado.

Em regiões urbanas complexas, como é o caso da RMSP, o controle efetivo das cargas industriais, a logística de transporte dos resíduos da fonte geradora (ETE) até a destinação final (aterro), e, os teores máximos admitidos de líquidos livres no lodo, são fatores que podem inviabilizar técnica ou economicamente essa alternativa.

Tabela 4 – Comparação de custos de disposição final

Alternativas de disposição final	Custo (US\$/ton)
Aterros Sanitários	20 a 60
Incineração	55 a 250
Reciclagem Agrícola	20 a 125

Fonte: Carvalho & Barral (1981), citados por Andreoli, Fernandes & Domaszak (1997)

4.2. WTE - Waste-to-Energy

WTE (waste-to-energy), ou, geração de energia elétrica a partir de resíduos pode ser uma alternativa para a redução dos volumes crescentes de resíduos sólidos gerados no tratamento de esgotos, sendo uma alternativa sustentável ambientalmente por não ocupar espaço nos aterros sanitários, e gerar energia elétrica de fonte renovável, em um país cada vez mais exposto à vulnerabilidade climatológica.

Quando comparado com a solução de aterro sanitário, os estudos econômico-financeiros de um projeto WTE devem considerar não apenas a venda ou redução da conta de energia elétrica, mas também do valor pago aos aterros sanitários e no transporte desses resíduos.

De acordo com a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), o custo de geração no Brasil varia entre R\$ 350/MWh a R\$550/MWh.

A Tabela abaixo compara estes custos com o Levelized Cost of Energy – em outras palavras, o custo real (custo total / geração total) de cada fonte, para os anos de 2015 a 2019, a partir de dados publicados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). É possível ver que este custo não é muito mais alto que os das térmicas a gás, e menor que os das térmicas a biomassa.

Tabela 5 - Custo Energia Entregue (R\$/MWh)

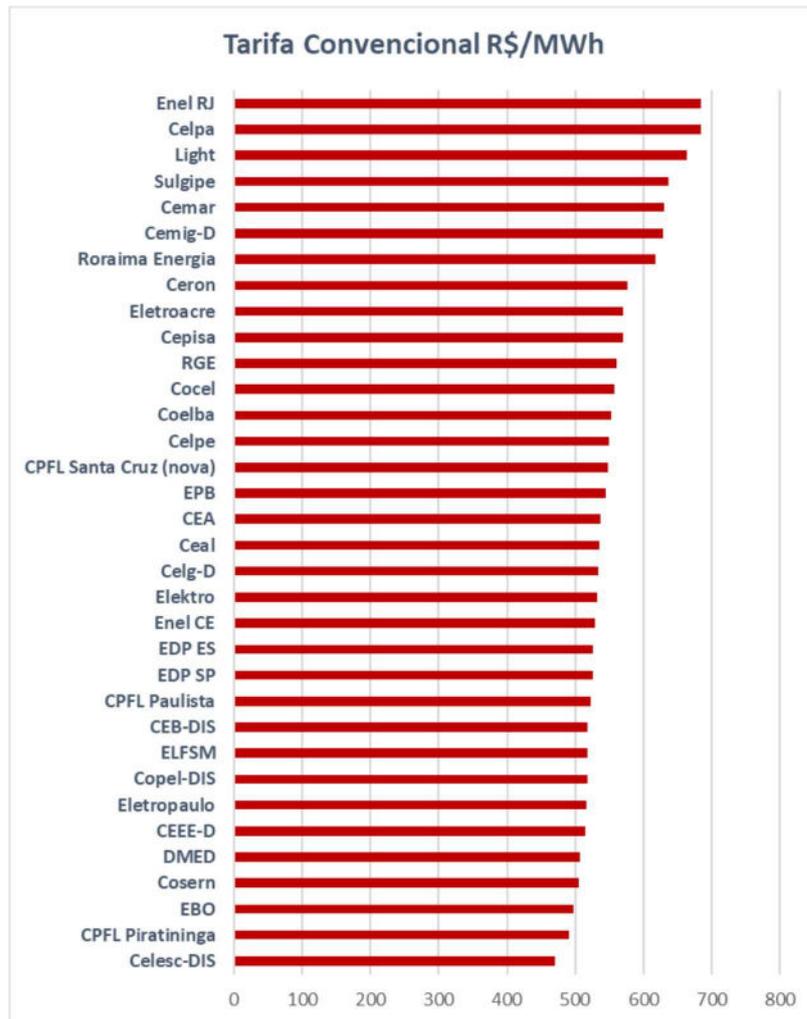
	UHE	PCH/CGH	Eólica	Nuclear	Gás/GNL	Óleo	Diesel	Carvão	Biomassa (Lodo)
2015	205,61	201,28	309,50	188,30	431,78	549,74	1.116,79	232,67	502,12
2016	195,87	253,23	213,19	212,10	404,73	707,74	6.442,12	239,16	480,48
2017	206,69	262,97	391,74	229,42	467,49	1.138,44	6.511,38	238,08	429,62
2018	221,82	271,08	284,19	272,43	302,90	746,46	895,46	298,40	466,32
2019	218,03	255,18	302,54	302,39	347,93	1.112,74	1.163,95	281,49	475,82
Média	209,60	248,75	300,23	240,93	390,97	851,02	3.225,94	257,96	470,87

Fonte: Trabalho Benefícios da geração Waste-to-Energy: custos evitados

Segundo Pinto; Szczupak, 2020, o custo da energia para o consumidor cativo (ligado às distribuidoras) é maior que nossa referência. A Figura 4 mostra os custos de março de 2020 da tarifa convencional para as principais distribuidoras do Brasil, informados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), sem considerar a

incidência de impostos (ICMS, PIS/PASEP). Segundo a ANEEL, nessa data, a tarifa média no Brasil era de R\$560/MWh.

Figura 4 - Custos de março de 2020 da tarifa convencional para as principais distribuidoras do Brasil



Fonte: ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

A conclusão é imediata: não há tarifa menor que o custo da energia a partir de resíduos. Em outras palavras, em uma análise meramente financeira, um consumidor cativo poderia aderir à chamada autoprodução, e simplesmente substituir o suprimento da distribuidora por uma usina WTE, com vantagens econômicas.

4.3. Processos térmicos

Os processos térmicos mais comuns são a pirólise, a gaseificação e a combustão/incineração.

A incineração se distingue da combustão por ter como principal objetivo o tratamento de um lodo que não possa ser queimado de forma segura devido à presença efetiva ou potencial de precursores de poluentes não convencionais (especialmente metais e/ou dioxinas e furanos) nas emissões atmosféricas ou nas cinzas, sendo a geração de energia um objetivo secundário.

Já a combustão tem como principal finalidade a obtenção de energia pela queima, quando esta puder ser realizada de forma segura sem necessidades especiais de prevenção e/ou controle dos poluentes não convencionais Fytili e Zabaniotou (2008).

Em todos os tratamentos térmicos pode-se obter uma expressiva redução do volume/massa de resíduos finais, prevenção de odores e eliminação da biodegradabilidade e potencial de formação de metano e chorume. O tratamento de lodo de ETE deve ser precedido das etapas de desidratação e secagem do lodo Werle e Wilk (2010). Para a determinação do potencial de uso de lodo de ETEs como combustível em processos térmicos faz-se necessário o conhecimento da composição elementar e dos principais componentes presentes.

Segundo Werle e Wilk (2010), a aplicabilidade do uso de processos térmicos como disposição final de lodo de ETE é dado em função do seu poder calorífico e de sua composição imediata. O poder calorífico superior (PCS, base seca) para lodos de ETEs são da ordem de 17MJ/kg para lodo bruto, 15MJ/kg para lodo ativado e 11MJ/kg para lodo digerido por processos aeróbios, anaeróbios ou pelo uso de cal.

As principais características dos processos térmicos de pirólise, gaseificação e combustão são apresentadas no Quadro 1, enquanto no Quadro 2 são destacadas as vantagens e desvantagens do uso do lodo nesses processos. Observa-se que a fração dos subprodutos gerados está relacionada às condições operacionais, sendo as mais relevantes: pressão, temperatura, umidade e teor de oxigênio.

Quadro 1 - Comparação dos processos térmicos para lodos de ETEs.

Parâmetro de comparação	Pirólise	Gaseificação	Combustão
Requerimento de secagem prévia	Sim ¹	Sim	Não
Temperatura de operação (°C)	400 - 800	800 - 1.400	850 – 9.502
Pressão para operação	Ambiente ou ligeiramente inferior/ superior ³	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 ₄ , H ₂ O, álcoois, aldeídos, fenóis etc	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, NO _x , etc.	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , NO _x , etc
Quantidade dos gases produzidos	Variável	Muito Alta	Muito Alta
Utilidade dos gases	Cogeração	Cogeração	-
Utilidade dos líquidos	Cogeração	-	-
Utilidade dos sólidos	Cogeração, agricultura	Agricultura	Agricultura

Notas: 1. Requerimento de 150 °C para um nível de 25% de sólidos. 2 Temperatura mínima, a máxima depende de condições de chama. 3. Depende do principal produto final almejado (vapores ou sólidos). 4. Depende da pressão e velocidade de aquecimento do substrato (rápida ou lenta).

Fonte: Rosa et al. (2014). Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos.

Quadro 2 - Análise comparativa das principais alternativas de tratamento térmico para lodo de ETE - balanço de vantagens e desvantagens.

	Vantagens	Desvantagens
Pirólise	<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/m³.</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>
Gaseificação	<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 syngas.</p>

Combustão	A co-combustão 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.	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 NOx, SOx , 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.
-----------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Rosa et al. (2014). Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos.

Segundo Rosa et al. (2014), os processos térmicos de pirólise, gaseificação e combustão, até então empregados para outras fontes de biomassa, têm sido considerados alternativas para o gerenciamento de lodo desidratado em ETEs. A combustão, entre os processos, é o precursor; a pirólise e a gaseificação têm sido tema crescente de estudos e pesquisas aplicadas.

5. CASES REAIS DE USO DO LODO E DO BIOGÁS

Na cidade de Franca, operada pela SABESP, um projeto realizado em parceria com o instituto alemão Fraunhofer possibilitou a produção e abastecimento de veículos da frota da Companhia com biogás.

Na ETE Barueri, testes realizados transformam o lodo gerado em um composto inerte e vítreo. Trata-se de um sistema de gaseificação por tochas de plasma térmico com capacidade para processar 15 ton/dia de lodo digerido desaguado gerado nos processos de tratamento da própria estação. Os resíduos sólidos gerados pelo sistema de gaseificação são inertes, vítreos e não lixiviáveis podendo ser utilizados

como agregado na indústria civil ou cerâmica. Este sistema elimina dioxinas ou furanos em função das altas temperaturas utilizadas no processo que ultrapassam 1.000°C pela baixa concentração de oxigênio (formação de gases não prejudiciais à saúde).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As empresas de Saneamento no Brasil estão em diferentes estágios de desenvolvimento, porém, na maior parte delas, a visão é que, o que sobra do tratamento de esgoto já deixou de ser visto como resíduo, e a meta agora é viabilizá-los como subproduto que possam ser reutilizados, gerando redução dos custos operacionais, receita e ganhos ambientais.

A aplicabilidade dos processos térmicos à realidade brasileira está condicionada à quantidade de lodo gerado e às especificidades locais, sendo potencialmente mais vantajosa em ETEs de maior porte, que possuem elevados gastos de transporte e destinação final. Nesse contexto, a combustão apresenta maior avanço tecnológico, além de maior simplicidade operacional e aplicação em ETEs de diferentes portes. Destacam-se a pirólise e a gaseificação como tecnologias que têm sido empregadas e aprimoradas de forma crescente.

As decisões operacionais em uma ETE, tem impacto direto na qualidade e quantidade dos resíduos gerados.

As soluções de aproveitamento normalmente são complementares. Por exemplo; o aproveitamento energético do lodo de forma individual, ou, em combinação com outros subprodutos gerados em ETEs, por exemplo o biogás, pode garantir a secagem do próprio lodo e favorecer o desenvolvimento e expansão do uso dos processos térmicos.

O estudo para definição de alternativas para uso dos sub-produtos das ETEs tem que levar em consideração vários aspectos como:

- Localização da planta
- Possíveis parcerias para viabilizar investimentos e riscos compartilhados
- Vocação daquela unidade, em função da característica qualitativas do esgoto e resíduos produzidos

- Controle efetivo de cargas industriais
- Condicionantes técnicas para o Licenciamento

Existem cases, e estudos em escala de sucesso que podem ser utilizados como referência, como é o caso da ETE de Franca com o uso do Biogás para frota local de veículos.

Pela análise de cenário observa-se uma tendência das grandes empresas de Saneamento em implantar sistemas de co-geração de energia elétrica nos próximos anos. Sem dúvida com ganhos ambientais e econômicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019. São Paulo, 2019.

ANDREOLI, C.V., FERNANDES F. DOMASZAK, S.C. Reciclagem agrícola do lodo de esgoto. Curitiba, SANEPAR, 1997.

ANDREOLI, Cleverton Vitorio (coord.). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: Abes, 2006.

ANDREOLI, Cleverton Vitorio (coord.). Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003. v. 6, cap. 7, p. 299-317.

BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Brasília, DF: Presidência da República, [2007]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 01 mai. 2021.

CARVALHO, P.C. & BARRAL, M.F. Aplicação de lodo de esgoto como fertilizante. Fertilizantes, 3:1-4, 1981.

CENBIO. Relatório Técnico Final – Projeto ENERG-BIOG, São Paulo, 2004

CENBIO. Relatórios de Atividades – Projeto ENERG-BIOG, São Paulo, 2004.

COSTA, David Freire. Feração de Energia Elétrica a partir do biogás do tratamento de Esgoto. 194 f. Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DAVID, Airton Checoni. Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. FEHIDRO - Fundo Estadual de Recursos Hídricos.

FERNANDES, Fernando; LOPES, Deize Dias; ANDREOLI, Cleverton Vitorio; PEREIRA DA SILVA, Sandra Márcia Cesário. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE.

FYTILI, D. ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p.116–140, 2008.

GALVÃO JUNIOR, Alceu Castro. Desafios para a universalização dos serviços de água e esgoto no Brasil. *Rev Panam Salud Publica*. 2009; 25 (6): 548-56.

Lobato, L. C. S. (2011). Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico – Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais UFMG.

MARTINS Sebastião. Recuperação Energética (URE-WTE) Dos resíduos Sólidos Urbanos (RSU) – UM ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA - BRASIL

METCALF & EDDY Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th edition, McGraw Hill, New York. 2003. 1818 p.

MIKI, Marcelo K.; ALEM SOBRINHO, Pedro; VAN HAANDEL, Adrianus C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos - condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo.

NOYOLA, A.; SAGASTUME, J. M. M.; HERNANDEZ, J. E. L. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v.5, p.93-114, 2006.

Pinheiro, Igor Soares; Ferreira, João Alberto. *Economicidade dos serviços de coleta e transporte de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: Escola de Contas e Gestão do TCE-RJ, 2017.

PINTO Leontina, SZCZUPAK Helena. *Benefícios da geração Waste-to-Energy: custos evitados*. 2020

Plano de Modernização do Tratamento de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo – (PLAMTE) – SABESP – (2014 – em andamento).

PORTAL TERA AMBIENTAL. Guia de Gestão de Resíduos. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/guia-de-gestao-de-residuos-tks?SubmissionGuid=5830960e-b9d0-40c1-97e6-4bf823ac6703>. Acesso em: 01 mai. 2021.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. Publicado em 19/05/2018. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-eetes/>. Acesso em: 24 jan. 2020.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Diretoria de Sistemas Regionais. Unidade de Negócio Capivari / Jundiaí. Acervo de informações técnicas. Itatiba, 2020.

ROSA André Pereira, CHERNICHARO Carlos Augusto de Lemos, MELO Gilberto Caldeira Bandeira, Artigo técnico. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. 2014.

Rosso, D., Huo, D.L., and Stenstrom, M.K. (2006) Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer, Chem. Eng. Sci, in press.

SABESP. Companhia e Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2021.

SABESP. Síntese de Informações Operacionais dos Sistemas de Tratamento de Esgotos da RMSP – 2010 a 2021. Unidade de Negócio de Tratamento de Esgotos, 2021.

SANTOS, Marilin Mariano. IEE – USP. Produção e uso de biogás no Brasil, 2016

WEETMAN Catherine. Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa

WERLE S.; WILK R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. Renewable Energy, doi:10.1016, 2010.