



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

**Sarah Barbacena Silva**

**ETE GOIÂNIA-GO: ESTUDO AMBIENTAL E GESTÃO DO LODO**

**Goiania, 2017.**

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Sarah Barbacena Silva

**ETE GOIÂNIA-GO: ESTUDO AMBIENTAL E GESTÃO DO LODO**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado  
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de  
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:  
Tecnologia de Redução e Gerenciamento de  
Resíduos.

Orientador: Profa. Dr. Warde Antonieta da  
Fonseca-Zang.

Coorientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

**Goiânia, 2017.**

Si381e Silva, Sarah Barbacena.

ETE Goiânia-GO: estudo ambiental e gestão do lodo / Sarah Barbacena Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2017. 124f. : il.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Warde Antonieta da Fonseca-Zang.  
Coorientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Tratamento de esgoto. 2. Gestão do lodo. 3. Aproveitamento energético. I. Fonseca-Zang, Warde Antonieta da (orientadora). II. Zang, Joachim Werner (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

**CDD 628.3**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740  
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO**  
**IFG CAMPUS GOIÂNIA**  
**MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

Sarah Barbacena Silva

**ETE GOIÂNIA-GO: ESTUDO AMBIENTAL E GESTÃO DO LODO**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em  
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG  
(PPGTPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional.  
Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de  
Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de  
Redução e Gerenciamento de Resíduos.

---

Profa. Dr. Warde Antonieta da Fonseca-Zang - presidente da Banca (orientador)

---

Prof. Dr. Joachim Werner Zang , (coorientador)

---

Profa. Dr. Regina Célia Bueno da Fonseca - membro da Banca Examinadora

**Aprovado em: 25/08/2017**

## DEDICATÓRIA

A minha mãe Ivânia Luiza Barbacena

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pelo discernimento da sabedoria.

Agradeço a minha família que me apoiou e me incentivou nesta caminhada, em especial minha mãe Ivânia, que esteve sempre do meu lado.

Aos professores Warde e Joachim pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Alcides, pela paciência e companheirismo durante as etapas de trabalho.

Aos colegas e professores do mestrado pelos momentos e conhecimentos compartilhados nesses dois anos de curso.

Aos setores da SANEAGO que colaboraram de forma direta e indireta com dados da empresa, especialmente Kellya de Moraes e Silva, Shirley Queiroz de Roure, da Supervisão operacional da ETE Goiânia e Luanna Gonçalves de Paula, da Gerência de Tratamento de Esgotos da Região Metropolitana de Goiânia/GO.

Aos meus amigos pelo companheirismo.

A todos que colaboraram de uma forma ou de outra na realização deste estudo.

## **EPIGRAFE**

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estivermos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.

*Dalai Lama*

Título: ETE Goiânia-GO: Estudo ambiental e Gestão do Lodo.

Autor: Sarah Barbacena Silva

Orientador: Warde Antonieta da Fonseca-zang

Coorientador: Joachim Werner Zang

## RESUMO

A estação de tratamento de esgotos de Goiânia (ETE Goiânia) possui diversos impactos ambientais inerentes aos seus processos operacionais, sendo o principal deles a gestão do lodo de ETE. A problemática do lodo da ETE Goiânia envolve o alto volume gerado (cerca de 110 toneladas diárias) e o correto destino deste resíduo. Seu gerenciamento é complexo e oneroso devido às características de patogenicidade e alto teor de umidade, devendo seguir à risca as legislações ambientais vigentes. Atualmente o lodo é destinado para a recuperação de pastagens no município de Hidrolândia e essa logística gera altos gastos para a Empresa de Saneamento de Goiás (SANEAGO) responsável pela gerência da ETE. Por isso, este trabalho desenvolveu avaliação de impactos ambientais na ETE Goiânia incorporando o estudo comparativo de tecnologias disponíveis no aproveitamento de conteúdo energético e nutricional do lodo gerado, levando em conta sua gestão e benefícios socioambientais. Para identificação dos impactos ambientais existentes na ETE, este estudo fez uso do método de listagens e de Matriz de Interações. Estes métodos delinearão as atividades da unidade de tratamento de esgotos e seus respectivos fatores/impactos ambientais inerentes ao funcionamento da ETE. Como resultados, os itens com danos de alta relevância foram relacionados ao transporte de areia, detritos, resíduos sólidos, de chorume de aterro sanitário, de efluente de limpa fossa e os danos relativos à disposição de areia, detritos, resíduos sólidos no aterro sanitário do município. Caracterizou-se também a análise de custos de energia elétrica na ETE, que revelou altos custos para manutenção da unidade. A gestão do lodo de ETE foi identificado como uma das principais ações impactantes, apesar de se enquadrar como um dano reversível. Este fato sustenta a premissa de que a ETE Goiânia necessita de investir em tecnologias alternativas de gerenciamento e aproveitamento energético do lodo de ETE e se possível, fazer uso do lodo no interior da unidade, poupando gastos e impactos negativos de deslocamento do lodo.

Palavras-chave: Gestão do lodo de ETE; Impactos ambientais; Aproveitamento energético alternativo.



TITLE: Sewage treatment unit of Goiania-GO: Environmental impact assessment and sewage sludge management.

AUTHOR: Sarah Barbacena Silva

ADVISER: Warde Antonieta da Fonseca-zang

CO-ADVISER: Joachim Werner Zang

## **ABSTRACT**

The sewage treatment plant in Goiânia (ETE Goiânia) has some environmental impacts inherent to its operational processes. The management of the sewage sludge is the main problem. It involves a high generated sludge volume (about 110 tons per day) and its correct destination. Its management is complex and costly due to the characteristics of pathogenicity and high moisture content, and the current environmental legislation must be followed. Currently, the sewage sludge has been transported to the Municipality of Hidrolândia for the recovery of pasture soil, and this logistic generates high expenses for the Sanitation Company of Goiás (SANEAGO), which is responsible for the management of the ETE. Therefore, this project was applied to assess the environmental impacts of the ETE Goiânia activities, and to incorporate a comparative consideration of the available technologies in the use of energy and nutritional content of the sewage sludge, taking into account its management and socio-environmental benefits. To identify the environmental impacts, this work applied the checklist and the Interaction Matrix methods. These procedures outlined the activities of the sewage treatment unit and their respective environmental factors and impacts. As results, the considered items of high impacts relevance were related to the transport of sand, debris, solid waste, landfill slurry, sewage effluent and the effects related to their disposal in the municipal landfill. It was also considered an analysis of costs of electric energy in the unit, which revealed high costs for its maintenance. The management of the sewage sludge was identified as one of the main impact actions, although it is considered a reversible damage. This fact supports the premise that ETE Goiânia needs to invest in alternative technologies for the management and energy utilization of ETE sludge and, if possible, to make use of the sludge inside the unit, saving costs and negative impacts of the sludge displacement.

Keywords: Sewage sludge management; Environmental impacts; Alternative energy use.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Irradiância solar direta do Brasil (Kwh/m <sup>2</sup> /dia) .....	53
Figura 2: Esquemática do sistema de aquecimento solar .....	56
Figura 3: Estrutura Interna do secador solar ThermoSystem Solar Dryer e a atuação do Eletric Mole .....	57
Figura 4: Vista externa do secador solar thermo-system solar dryer .....	57
Figura 5: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia .....	58
Figura 6: Processos de bioconversão anaeróbia integrada em recuperação de recursos a partir de resíduos .....	61
Figura 7: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de baixa taxa .....	68
Figura 8: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de um estágio e alta carga .....	69
Figura 9: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de dois estágios e de alta carga .....	70
Figura 10: Exemplo da eficiência da cogeração de energia elétrica e calor .....	73
Figura 11: Ilustração dos processos e tecnologias de conversão termal .....	77
Figura 12: Imagem de satélite da localização da ETE Goiânia e suas etapas de operação .....	85
Figura 13.1: Detalhes do tratamento preliminar. ....	88
Figura 13.2: Detalhes do tratamento preliminar. ....	89
Figura 14: Decantador primário em funcionamento .....	90
Figura 15: Detalhes do tratamento primário quimicamente assistido .....	91
Figura 16: Matriz de interações das atividades versus fatores e impactos ambientais da ETE Goiânia .....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Etapas intermediárias do tratamento do lodo e seus principais objetivos .....	37
Tabela 2:Principais componentes extraídos do lodo .....	46
Tabela 3:Composição do biogás em porcentagem, distribuídos de acordo com seus constituintes .....	62
Tabela 4:Relação de gases e seus respectivos poderes caloríficos .....	63
Tabela 5:Descrição das principais alternativas para gerenciamento do biogás .....	71
Tabela 6:Análise das vantagens e desvantagens da combustão do lodo de ETE .....	79
Tabela 7:Macronutrientes do lodo de ETE no ano de 2016 .....	92
Tabela 8:Estimativa de custo referente a energia elétrica.....	94
Tabela 9:Resultados quantitativos das interações identificadas na matriz e a cor referente à gravidade do impacto ambiental .....	99
Tabela 10:Volume gerado de areia, detrito e limpa-fossa no ano de 2016 na ETE .....	100
Tabela 11:Volume recebido de chorume no ano de 2016 na ETE.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AIA:** Avaliação de Impactos Ambientais
- CETESB:** Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CEEJ:** Consócio ETEP-ESTÁTICA-JNS
- CELG:** Companhia Energética de Goiás
- CEPT:** Chermical Enhanced Primary Treatment
- CONAMA:** Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COV:** Compostos Orgânicos Voláteis
- DBO:** Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO:** Demanda Química de Oxigênio
- EEEB:** Estação Elevatória De Esgoto Bruto
- EELP:** Estação Elevatória De Lodo Primário
- EPA:** United States Environmental Protection
- ETE:** Estação de Tratamento de Esgoto
- ETE GOIÂNIA:** Estação de Tratamento de Esgotos de Goiânia
- FUNASA:** Fundação Nacional de Saúde
- GNC:** Gás Natural Combustível
- IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IFG:** Instituto Federal De Goiás
- MMA:** Ministério do Meio Ambiente
- NEA:** Núcleo De Educação Ambiental
- NMP:** Número Mais Provável
- NPK:** Nitrogênio, Fósforo e Potássio
- OD:** Oxigênio Dissolvido
- PCS:** Poder Calorífico Superior
- PFRP:** Process to Further Reduce Pathogens
- pH:** Potencial Hidrogeniônico
- PNSB:** Política Nacional de Saneamento Básico no Brasil
- PROSAB:** Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
- SANEAGO:** Empresa de Saneamento de Goiás
- SANEPAR:** Companhia de Saneamento do Paraná
- SGD:** Solar Greenhouse Drynig

**SNIS:** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

**SS:** Sólidos Suspensos

**SST:** Sólidos Suspensos Totais

**SV:** Sólidos Voláteis

**SVB:** Sólidos Voláteis Biodegradáveis

**SVR:** Sólidos Voláteis Refratários

**TPQA:** Tratamento Primário Quimicamente Assistido

**TQA:** Tratamento Quimicamente Assistido

**UFP:** Unidade Formadora de Placa

**WERF:** Water Environment Research Foundation

**40 CFR Part 503:** Code of Federal Regulations nº 40, Part 503 – Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
OBJETIVO GERAL.....	18
OBJETIVO (S) ESPECÍFICO (S) .....	18
CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA DA PESQUISA .....	19
1.1 PROBLEMÁTICA DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO - ETE'S E DO LODO.....	19
1.2 DEFINIÇÃO E CONCEITOS DE ESGOTOS SANITÁRIOS.....	22
1.3 COMPOSIÇÃO DOS ESGOTOS SANITÁRIOS .....	23
1.3.1 Características físicas dos esgotos .....	23
1.3.2 Características químicas dos esgotos.....	25
1.3.3 Características biológicas dos esgotos .....	27
1.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	28
1.4.1 Tratamento preliminar .....	29
1.4.2 Tratamento primário .....	30
1.4.3 Tratamento secundário .....	30
1.4.4 Tratamento terciário .....	30
1.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS.....	31
1.5.1 Métodos de avaliação e identificação de impactos ambientais.....	32
1.6 IMPACTOS RECORRENTES DAS ETES .....	34
1.7 LODO DE ETE: GERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	34
1.7.1 Composição e tratamento do lodo de ETE's.....	36
1.8 TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO E APROVEITAMENTO DO LODO: USO NUTRICIONAL PARA PLANTAS..	46
.....	46
Biossólidos Classe A .....	48
Biossólidos Classe B .....	49
Uso de lodo de ETE na indústria de fertilizantes .....	49
1.9 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO: SECAGEM DE LODO DE ETE .....	52
1.9.1 Avaliação do recurso solar no Brasil .....	53
1.9.2 Secagem solar natural .....	54
1.9.3 Secagem solar artificial .....	54
1.9.4 Secagem solar com uso de estufa - Solar Greenhouse Drynig (SGD).....	55
1.9.5 Secador de estufa em modo ativo .....	55
1.10 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO: DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO OU BIOMETANIZAÇÃO .....	57
1.10.1 Rota metabólica da biometanização .....	58
1.10.2 Produtos da Biometanização.....	60
1.10.3 Fatores que interferem no processo .....	63
1.10.4 Biogás: Estimativa, purificação, produção e aproveitamento energético .....	65
Estimativa de geração de biogás.....	66
Tecnologias de produção de Biogás .....	66
Métodos de aproveitamento energético do biogás.....	70
1.11 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO: CONVERSÃO TERMAL .....	76
Combustão.....	78
CAPÍTULO II – ARTIGO ORIGINAL .....	81
RESUMO .....	81
ABSTRACT .....	82
INTRODUÇÃO.....	82
METODOLOGIA.....	83
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	84
Caracterização geral da ETE Goiânia.....	84
Tratamento de esgotos na ETE Goiânia .....	85
Avaliação de Impactos Ambientais da ETE Goiânia.....	95
Tecnologia de aproveitamento energético e nutricional do lodo de ETE .....	105
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	106
AGRADECIMENTOS.....	108
REFERÊNCIAS (ARTIGO) .....	109
CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA.....	110
REFERÊNCIAS GERAIS DA DISSERTAÇÃO.....	114
RESUMO DO CURRÍCULO LATTES.....	124

## INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da população mundial ocorrido nos últimos anos gerou uma pressão cada vez maior no consumo de recursos naturais, e conseqüentemente, na forma de descarte e de tratamento de resíduos. Um dos setores que mais necessita de investimento em infraestrutura é o saneamento básico, que envolve tratamento de água e esgoto e manejo de resíduos. Segundo a pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em 2014 foram investidos no Brasil R\$ 12.197.700 na área, sendo R\$ 5.061.900 para os sistemas de tratamento de água e R\$ 5.607.100 nos serviços de esgotamento (afastamento) sanitário. Apesar do elevado investimento nacional em esgotamento sanitário, o índice de atendimento de esgoto ainda é de 57,64%, valor muito inferior se comparado ao índice de atendimento urbano de água de 93,16% (SNIS, 2016).

No estado de Goiás, 95,47% da população urbana é atendida pela rede de abastecimento de água tratada, valor que supera a média nacional, já a coleta de esgoto é de 52,04% e 85,50% desse esgoto coletado passa por tratamento de efluentes, de acordo com a legislação vigente (SNIS, 2016).

A capital Goiânia e sua região metropolitana é abastecida pela Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte que representa 3,56% da área do território estadual e abastecia em 2010, uma população aproximada de dois milhões de pessoas. A população estadual atual contabilizada em seis milhões de habitantes, passaria a oito milhões em 2035, fato que elucida a importância de investimentos no saneamento básico desta região, principalmente no referente ao tratamento de esgoto (SECIMA, 2016).

A Empresa de Saneamento de Goiás (SANEAGO) responde por 52,7% dos serviços de coleta, transporte e tratamento dos esgotos sanitários e atende uma população de 2.993.640 habitantes, o que representa 45,28% da população total do estado de Goiás (IBGE, 2015; SANEAGO, 2016). Na cidade de Goiânia estão distribuídas três Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's) que conjuntamente atendem cerca de 88,5% da população. A Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE Goiânia), inaugurada em 2003, recebe uma vazão média de 1400 litros por segundo de esgoto e possui capacidade de tratamento de até 2300 litros por

segundo. Cerca de 57% do total de esgoto coletado na cidade passa por tratamento nesta unidade (SANEAGO, 2016; IBGE, 2016).

O tratamento de efluentes na ETE Goiânia contempla as etapas preliminar com a remoção de materiais grosseiros e areia e a fase primária quimicamente assistida, atingindo eficiências de remoção de 50% da matéria orgânica na forma de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de cerca de 80% de sólidos suspensos totais (SST) (Jordão et al., 2005; SANEAGO, 2016).

As etapas de tratamento na ETE Goiânia são compostas por operações e processos unitários, e considerando os instrumentos de avaliação de impactos ambientais, são necessárias tanto a identificação das atividades potencialmente poluidoras, quanto as respectivas medidas de controle ambiental, tais como mitigadoras e preventivas (LINS, 2010).

A etapa primária da ETE Goiânia gera cerca de 110 toneladas de lodo bruto diariamente, material esse, resultante da decantação dos sólidos suspensos (SS) no decantador primário. O lodo possui características indesejáveis, dificultando o seu manejo e destinação final (SANEAGO, 2016).

A NBR 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define lodo de ETE's como resíduo sólido. Este resíduo pode ser classificado de acordo com seu grau poluidor e suas características de periculosidade, toxicidade, patogenicidade e até reatividade.

Quanto ao gerenciamento do lodo, diversas técnicas são aplicadas para reduzir seu volume e quantidade de patógenos (estabilização da matéria orgânica), tais como, adensamento, desidratação, desinfecção, acondicionamento e a destinação final. Segundo von Sperling e Andreoli (2001), o lodo representa somente 1% a 2% do volume total de esgoto tratado. Em contrapartida, possui alto gastos com seu tratamento, variando de 20% a 60% do custo total de operação da ETE (ANDREOLI, 2001)

O tratamento e disposição final do lodo se torna um processo oneroso para o gerador. O custo vinculado com a destinação do lodo é proporcional ao volume de resíduo gerado (RICHTER, 2013). No caso da ETE Goiânia, o lodo gerado diariamente possui duas alternativas de destinação, na recuperação de áreas de pastagem e na disposição final no Aterro Sanitário de Goiânia respeitando a resolução nº 375/2006 do CONAMA. A gestão do lodo da ETE Goiânia envolve elevados custos de transporte (SANEAGO, 2016).



O lodo é visto como o maior desafio para as ETE's. Para mitigar impactos negativos causados por esse resíduo, tecnologias têm sido desenvolvidas para seu aproveitamento nutricional e energético, gerando retorno financeiro e subprodutos altamente mineralizados.

Uma tecnologia utilizada é a digestão anaeróbia com uso de biodigestores. Inicialmente requer um certo investimento inicial, mas, além de reduzir o volume de lodo a ser manuseado, oferece a oportunidade de recuperação de energia e de um composto. Esta tecnologia produz o biogás, elemento de fonte combustível, e subproduto biofertilizante, que contém altas concentrações de fósforo e nitrogênio, podendo fechar ciclo mineral no solo como adubo em diversas culturas (RAHAMAN et al., 2014).

Outra técnica em expansão para destinação do lodo é o uso de secagem solar. Para execução, usam-se secadores térmicos, que são capazes de diminuir a umidade do lodo em até 90% e proporciona o aumento do poder calorífico, transformando o lodo em um potencial combustível. Além disso, devido às altas temperaturas o composto se torna livre de patógenos e, portanto, sem riscos para os humanos (Leonard et al., 2008). Ainda sobre os secadores térmicos, nota-se que está em expansão o uso desse sistema em conjunto com a cogeração de energia, os quais se utilizam o calor oriundo da queima de lodo para reintroduzi-lo na ala de secagem, acelerando o processo de diminuição da umidade (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012).

Com as informações expostas, o estudo proposto é justificável, pois, o mesmo busca contribuir para a recomendação de alternativas para o aproveitamento e destino final do lodo, além de discutir aspectos técnicos, econômicos e ambientais das tecnologias de aproveitamento energético do lodo de ETE e que pode no futuro servir de subsídio para a SANEAGO aprimorar seus sistemas. Contribuições teóricas e técnicas para o gerenciamento e destino correto do lodo da ETE Goiânia são necessidades atuais e cruciais para o avanço do tratamento de esgotos desta unidade.

Este trabalho possui dois grandes capítulos, que seguem a introdução, sendo o primeiro uma revisão bibliográfica sistemática, expondo a temática das ETE's no Brasil e a problemática de gestão do lodo de ETE nas etapas de geração, tratamento e disposição final, além de seu aproveitamento energético e nutricional. Já o segundo capítulo com o desenvolvimento da pesquisa, contém os aspectos que encorpam o tema, a metodologia da pesquisa, a descrição dos processos na ETE Goiânia, discussão dos resultados encontrados em consonância com a literatura e a problemática exposta, e

as considerações finais de acordo com os resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros juntamente de proposta para a SANEAGO sobre a temática.

### **OBJETIVO GERAL**

Aplicar pesquisa de avaliação de impactos ambientais na maior Estação de Tratamento de Esgoto de Goiânia (ETE Goiânia), na forma de estudo de caso, incorporando estudo comparativo de tecnologias disponíveis no aproveitamento de conteúdo energético e nutricional do lodo gerado diariamente no sistema de tratamento, considerando sua gestão e diferentes perspectivas e benefícios socioambientais.

### **OBJETIVO (S) ESPECÍFICO (S)**

- Levantar a situação atual da ETE quanto à geração de resíduos;
- Aplicar a metodologia de Avaliação de Impactos Ambientais na ETE;
- Verificar a gestão do lodo destinado para áreas de pastagem e o aterro municipal de Goiânia;
- Analisar viabilidade de tecnologia sustentável para aproveitamento do lodo de ETE, dentre as disponíveis, tais como secagem do lodo pelo método solar com ou sem uso da cogeração, aproveitamento de biogás a partir do lodo; e
- Sugerir alternativa para gestão do lodo, visando aproveitamento energético e nutricional.

## **CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA DA PESQUISA**

### **1.1 PROBLEMÁTICA DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO - ETE'S E DO LODO**

O crescimento populacional e a intensa industrialização têm gerado um aumento gradativo na poluição ambiental. Este fato mobilizou a comunidade e incentivou o poder público na criação de normativas específicas para o setor de saneamento básico brasileiro. Em 2007, foi criada a Lei 11.445, que estabelece a Política Nacional de Saneamento Básico no Brasil - PNSB, nela o saneamento básico é definido como o conjunto de serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos e drenagem e manejo de águas pluviais. Dentre os serviços citados, água e de esgoto são os mais essenciais dos serviços públicos, tanto pela manutenção da saúde pública, quanto pela busca do bem-estar social, preservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico (FILHO *et al.*, 2008).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2008), 55,2% dos municípios brasileiros tinham serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, marca pouco superior à observada na pesquisa anterior, realizada em 2000, que registrava 52,2%. Ou seja, há deficiência de rede coletora em 2495 municípios, distribuídos pelas Unidades da Federação, com exceção do Estado de São Paulo, onde apenas uma cidade não apresentava o serviço de esgotamento através de rede coletora.

Já em relação os serviços de abastecimento de água o PNSB (2008) revela que, dos 5564 municípios brasileiros existentes em 2008, 5531 (99,4%) realizavam abastecimento de água por rede geral de distribuição em pelo menos um distrito ou parte dele. O manejo de resíduos sólidos estão estabelecidos em todos os municípios (100,0%) e manejos de águas pluviais englobam 94,5% do total de municípios. Deste modo, avalia-se que o saneamento básico está ainda muito aquém das necessidades mais elementares da população brasileira e o serviço que mais necessita de investimento é a esgotamento sanitário.

Segundo Sistema Nacional de Saneamento Ambiental – SNIS (2016), a população servida por redes de água atinge 163,2 milhões ou 83% do total da população, chegando a 93,2% em sistemas urbanos. A população total com acesso à rede de esgoto é de 98 milhões, ou 49,8% da população total, e considerando o total gerado de esgoto, o quantitativo de esgoto tratado não ultrapassa a 40,8%.

A existência de projetos de esgotamento sanitário varia ao longo das regiões brasileiras. De acordo com os dados do SNIS (2016), estatísticas de 2014, a região Sudeste possuía 45,7% de esgoto tratado e 78,3% de índice total de coleta de esgoto. Já a região Norte possuía apenas 14,36% do esgoto tratado, e o índice total de coleta de esgoto de 7,88%, valores bem abaixo da média nacional de 40,8% e 49,8 % respectivamente. A região Centro-Oeste, é a região com melhor desempenho, com coleta acima da média nacional com 46,4% e 46,9% respectivamente, porém o esgoto tratado não atinge nem a metade da população.

O processo de esgotamento sanitário constitui-se de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente (BRASIL, 2007). Dentre as etapas descritas, o tratamento de esgoto é considerado fator primordial para minimização dos impactos, oriundos da geração de efluentes.

Uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é composta por unidades de tratamento constituídas por processos físicos, físico-químicos e biológicos responsáveis por estimular e propiciar condições naturais de autodepuração da matéria orgânica no interior de unidades específicas e detentoras de área determinada. Através destas ações, é possível controlar a decomposição da matéria e devolver o efluente tratado ao meio ambiente (LA ROVERE *et al.* 2002).

A preocupação com o tratamento de esgotos sanitário no Brasil iniciou-se com a inauguração da Estação de Tratamento de Esgotos da Glória, no ano de 1864, pelo então Imperador D. Pedro II, na cidade do Rio de Janeiro, com uma vazão de projeto igual a 28 L/s. Esta ETE adotava o processo de tratamento físico primário, quimicamente assistido, no qual, após o tratamento preliminar, seguia-se para a adição de produtos químicos (sulfato de alumínio, cal e carvão vegetal) e posteriormente para um decantador primário. O lodo, resultado do tratamento, era removido por barcaças e lançado em alto mar (PEQUENO, 2015).

Ressalta-se que nesta época, era comum o tratamento de esgoto de forma parcial, já que não havia legislações nem mesmo exigências dos órgãos ambientais para este setor. Apesar da importância das ETE's na manutenção da qualidade ambiental, no Brasil, somente no início da década de 80 houve a difusão da conscientização e o maior acesso às tecnologias de tratamento de efluentes.

Uma das primeiras ETE's construídas no Brasil foi a de Alegria no Rio de Janeiro (RJ), inaugurada no ano de 1883. Desde a sua construção, houve diversas mudanças nos mecanismos de tratamento. Em 2009, esta ETE foi ampliada a partir do programa de despoluição da Baía de Guanabara, em que houve a instalação da fase secundária de tratamento, chegando a tratar uma vazão média 5 m<sup>3</sup>/h e atender uma população de 2,5 milhões de pessoas. Atualmente, essa ETE gerencia seu resíduo de lodo através de centrifugação, adensamento e biodigestão anaeróbia, resultando em diminuição do volume do lodo e produção de gás metano. Há um projeto em andamento para aproveitamento energético do biometano produzido na ETE (BANDEIRA, 2011).

Outro exemplo brasileiro é a ETE Belém, pioneira na preocupação com o tratamento adequado dos efluentes domésticos. Ela foi projetada no final dos anos setenta e está em operação desde 1980. O tratamento é por etapas preliminares, primária e biológica, esta por lodos ativados de aeração prolongada. No ano de 2015, a ETE Belém passou por obras de melhorias com a instalação do Reator de Biofilme Móvel de Alta Taxa, para ampliar sua capacidade de tratamento de 840 L.s<sup>-1</sup> para 2.520 L.s<sup>-1</sup>. No projeto, estava previsto também a geração de cerca de 2,8 MW de energia através da biodigestão anaeróbia com produção de biogás. A matéria-prima para produção energética seria resíduos orgânicos do Ceasa e o lodo de esgoto adensado gerado na própria ETE (SANEPAR, 2016).

O advento de novas tecnologias de tratamento de esgoto no mercado tem facilitado à aquisição de procedimentos alternativos, que removem os teores de matéria orgânica e patógenos e inserem a destinação ambientalmente satisfatória para os resíduos gerados, como o lodo de ETEs. É certo que, a qualidade da operação e a eficiência destes sistemas estão diretamente relacionadas com as ferramentas gerenciais utilizadas. Neste contexto, os procedimentos e projetos de expansão e melhorias no do sistema de tratamento de esgotos são essenciais para obtenção de melhor desempenho no tratamento e de correta destinação de resíduos gerados como o lodo de ETE, principalmente no Brasil.

## 1.2 DEFINIÇÃO E CONCEITOS DE ESGOTOS SANITÁRIOS

Segundo a NBR 9648 (ABNT, 1986) e Von Sperling (2014), o esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Sendo:

- Esgoto doméstico é o despejo líquido proveniente de residências, comércios e órgãos públicos, frequentados por pessoas, que fazem uso da água para higiene e necessidades fisiológicas;
- Esgoto industrial é o despejo líquido resultante dos processos industriais, e possuem características que variam com os insumos usados na produção. Este efluente é gerado em locais específicos na rede de esgotos e possuem padrões de lançamento estabelecidos em lei;
- Água de infiltração é toda água proveniente do subsolo que penetra na rede coletora através de tubulações, junções ou poços de visitas defeituosos. A taxa de infiltração varia com tipo de solo e da posição do lençol freático, possuindo valores médios de 0,3 a 0,5 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>;
- Contribuição pluvial parasitária é a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário.

A rede coletora pública de esgoto de uma cidade é projetada para receber os esgotos domésticos, mas dificilmente esta projeção realmente acontece, pois normalmente há uma contribuição dos esgotos industriais. O recebimento dos despejos industriais na rede coletora deve ser precedido de certos cuidados, principalmente no que se refere à qualidade e à quantidade dos efluentes. Neste caso, os serviços de saneamento são responsáveis pelo atendimento aos padrões de qualidade ditados pelo órgão ambiental (FUNASA,2015).

Diante do exposto, a caracterização analítica dos esgotos é de suma importância para a definição da forma e do tipo de tratamento a ser utilizado. Estas informações podem ser obtidas através de análises físico-químicas e biológicas do esgoto, que indicam sua composição básica e as possíveis influências positivas ou negativas ao meio ambiente.

### 1.3 COMPOSIÇÃO DOS ESGOTOS SANITÁRIOS

A característica dos esgotos sanitários varia qualitativamente e quantitativamente de acordo com o uso da água, contendo aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, além dos micro-organismos. As substâncias componentes da fração sólida dos esgotos dependem principalmente dos costumes, do clima local, da situação social e econômica da população, bem como da quantidade de pessoas atendidas (FUNASA, 2015).

Para melhor definição da composição deste efluente recomenda-se um estudo de acordo com todas as características existentes no esgoto sanitário que podem ser divididas nos aspectos físicos, químicos e biológicos.

#### 1.3.1 Características físicas dos esgotos

As principais características físicas que representam o estado em que se encontram as águas residuárias são a coloração, a turbidez, o odor, teor de matéria sólida e a temperatura.

##### **Coloração e Turbidez**

A coloração e turbidez indicam o estado de decomposição do esgoto e fornecem dados que podem caracterizar a situação do efluente. A turbidez, especificamente, está relacionada diretamente com a concentração dos sólidos em suspensão e pode ser identificada também visualmente. Caso a coloração do esgoto seja preta, significa que o mesmo está velho e possui uma decomposição parcial, enquanto a tonalidade acinzentada já indica um esgoto fresco. Os esgotos mais frescos ou mais concentrados possuem geralmente maior turbidez (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2014).

##### **Odor**

Durante o processo de decomposição, alguns odores característicos de esgotos podem ser gerados. Jordão e Pessoa (2011) citam três odores como sendo os principais:

- odor razoavelmente suportável, típico do esgoto fresco;
- odor insuportável, típico do esgoto velho ou séptico, que provém da formação de gás sulfídrico oriundo da decomposição do lodo contido nos despejos; e

- odores variados, de produtos podres como de repolho, peixe, legumes; de fezes; de produtos rançosos; de acordo com a predominância de produtos sulfurosos, nitrogenados, ácidos orgânicos, etc.

### **Teor de matéria sólida**

Jordão e Pessoa (2011) classificam a matéria sólida presente nas águas residuárias seguindo a nomenclatura:

- função das dimensões das partículas, sendo sólidos em suspensão, sólidos coloidais ou sólidos dissolvidos;
- função da sedimentabilidade, sendo sólidos sedimentáveis, sólidos flutuantes ou flotáveis ou sólidos não sedimentáveis;
- função da secagem, a alta temperatura (550 a 600°C), sendo sólidos fixos ou sólidos voláteis;
- função da secagem em temperatura média (103 a 105°C), com sólidos totais, sólidos em suspensão ou sólidos dissolvidos.

Um dos parâmetros de grande utilização em sistemas de esgotos é a quantidade total de sólidos. Seu módulo é o somatório de todos os sólidos dissolvidos e dos não dissolvidos em um líquido. A sua determinação é normatizada, e consiste na determinação da matéria que permanece como resíduo após sofrer uma evaporação a 103°C (VON SPERLING, 2014).

### **Temperatura**

A temperatura é um aspecto físico que influencia na saturação de oxigênio dissolvido (O.D), as taxas de reações biológicas, as reações químicas e na viscosidade do esgoto. Caso a temperatura aumente, a concentração de saturação de O. D e a viscosidade diminuem, gerando aceleração da decomposição da matéria orgânica e sedimentação dos sólidos suspensos (LINS, 2010).

Segundo Jordão e Pessoa (2011) a faixa ideal da temperatura para manutenção da atividade biológica está entre 25 e 35°C. Esgotos a uma temperatura abaixo de 15°C desestabilizam as bactérias formadoras do metano, tornando-as inativas para digestão anaeróbia.



### **1.3.2 Características químicas dos esgotos**

Segundo a FUNASA (2015) para determinar resultados mais precisos geralmente utilizam-se métodos físicos e/ou biológicos juntamente com os parâmetros químicos. As principais características químicas dos esgotos domésticos podem ser classificadas em dois grupos: matéria orgânica e matéria inorgânica.

#### **Matéria orgânica**

Cerca de 70% dos sólidos no esgoto são de origem orgânica (sólidos voláteis). Geralmente estes compostos orgânicos são uma combinação de carbono, hidrogênio e oxigênio (matéria orgânica carbonácea), e algumas vezes com nitrogênio (matéria orgânica nitrogenada). Os grupos de substâncias orgânicas nos esgotos são constituídos por: proteínas (40 a 60%), carboidratos (25 a 50%), gorduras e óleos (10%) e ureia, surfactantes, fenóis e outros (FUNASA, 2015).

#### **Métodos de determinação da matéria orgânica**

Para determinação da composição da matéria orgânica no esgoto são utilizados métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são os mais usuais e medem a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO).

##### ***Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)***

É a forma mais utilizada para indicar o grau de poluição do esgoto através de um índice de concentração de matéria orgânica por uma unidade de volume de água residuária. A DBO é uma medida indireta da concentração de matéria orgânica presente em uma amostra. Ela é obtida através da determinação da quantidade de oxigênio consumido para conversão da matéria orgânica em matéria inorgânica, através da ação de bactérias aeróbias, em um determinado período de tempo e em temperatura favorável (PIMPÃO, 2011).

Durante o processo de decomposição aeróbia, a DBO reduz seus índices até atingir o valor nulo, fato que elucida a estabilização da matéria orgânica. Normalmente a uma temperatura de 20°C, e após 20 dias, é possível estabilizar cerca de 99% da matéria orgânica dissolvida ou em estado coloidal presente nos esgotos domésticos.

Segundo Von Sperling (2014), a DBO média de esgoto doméstico é de 300 mg.L<sup>-1</sup> e a carga per capita, que representa a contribuição de cada indivíduo por unidade de tempo é de 54 g.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> de DBO.

### ***Demanda química de oxigênio (DQO)***

A DQO é um parâmetro global utilizado como indicador indireto do conteúdo orgânico de águas residuárias e é amplamente utilizado no monitoramento de ETE's (AQUINO *et al.*, 2006).

O teste de DQO mede o consumo de oxigênio necessário para oxidação química da fração orgânica de amostra de esgoto, resultando em indicação indireta do teor de matéria orgânica presente (VON SPERLING, 2014).

### **Cloreto**

Segundo Jordão e Pessoa (2011) os cloretos são comumente originados pela dissolução de minerais no solo, intrusão de águas salinas, despejos industriais ou lixiviação de áreas agrícolas. Nos esgotos sanitários o maior responsável pela presença de cloretos são as excretas humanas. Infelizmente nos tratamentos convencionais de esgotos, os cloretos possuem remoção insignificante.

### **Nitrogênio**

O nitrogênio é um elemento fundamental para sustentar a atividade e diversidade biológica, para isso, sua quantidade nas águas deve estar de acordo com os valores de referência instituídos em lei, de modo a evitar a poluição hídrica.

O teste laboratorial para compostos de nitrogênio é essencial na caracterização dos esgotos sanitários. Nos esgotos, o nitrogênio pode se encontrar nas formas de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato ou gás nitrogênio. As bactérias transformam o nitrogênio orgânico em amônia e posteriormente, na ação de oxidação, em nitritos e depois em nitratos. O nitrato ao entrar no organismo humano pode gerar complicações no sistema respiratório e causar câncer através da sua conversão em nitrosamina. Assim, a forma predominante do nitrogênio em um curso de água pode fornecer indicações sobre o estágio da poluição, se recente ou mais remota (LINS,2010).

## **Fósforo**

As principais fontes antropogênicas de fósforo são os esgotos sanitários, industriais e fertilizantes lixiviados das áreas de agricultura. O fósforo presente nos esgotos está na forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico. No esgoto doméstico, a forma mais encontrada é de ortofosfato, forma que, pode entrar diretamente no metabolismo dos seres vivos sem transformação. Sua alta concentração nos corpos hídricos pode levar ao aumento na proliferação de algas e ocasionar o fenômeno da eutrofização. Ainda, os sabões e detergentes são os maiores responsáveis pela introdução de fosfatos nas águas (PESSOA E JORDAO, 2011).

## **Matéria inorgânica**

A matéria inorgânica existente nos esgotos é formada, em sua maioria, pela presença de componentes minerais dos sólidos em suspensão e de substâncias minerais dissolvidas. Uma parte é proveniente de água de lavagem de ruas e calçadas, bem como de infiltrações e lançamentos indevidos na rede coletora. Pelo fato de ser um material inerte, não há influência no tratamento de esgoto, entretanto deve-se atentar aos riscos de entupimento e saturação de filtros e tanques que podem ocorrer, quando há grande quantidade deste material (FUNASA, 2015).

### **1.3.3 Características biológicas dos esgotos**

Os parâmetros biológicos do esgoto sanitário estão ligados à presença de microorganismos vivos no efluente. Estes indivíduos são importantes, pois são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica no meio natural e nas estações de tratamento de esgotos. Neste processo, há uma transformação dos compostos complexos em outros mais simples, tais como sais minerais e gases (LINS, 2010).

## **Microorganismos**

Os principais microorganismos no tratamento de esgoto são as bactérias, os fungos, os protozoários, os vírus e as algas (FUNASA, 2015).

As algas apresentam grande variedade de formas e dimensões. No caso de lagos e lagoas, a reprodução de algas é estimulada com o lançamento de efluentes de estações de tratamento ricos em nutrientes (nitratos e fosfatos) que pode gerar o processo de eutrofização. (LINS, 2010).

Segundo Nuvolari (2011), as bactérias na sua grande maioria são unicelulares procariontes, que se reproduzem por divisão celular, possuem tamanho de 0,5 a 1  $\mu\text{m}$ , são filamentosas e sua absorção de nutrientes acontece pela membrana celular.

Nos esgotos, os fungos são menos frequentes possuindo forma filamentosa, estritamente aeróbia, e seu controle por anaerobiose temporária. Os protozoários existentes alimentam-se de bactérias dispersas. Este comportamento contribui para eliminação destas bactérias, já que, no decantador secundário (anaeróbio) parte das bactérias dispersas não aderem ao floco biológico e, portanto, não sedimentam, saindo juntamente com o efluente tratado (NUVOLARI, 2011).

## **Microorganismos patogênicos**

Segundo a FUNASA (2015) partes dos microorganismos encontrados nos esgotos são caracterizadas com nível de patogenicidade, fato este que gera a preocupação em relação à proteção da saúde pública. Os organismos patogênicos são as principais causas de doenças de veiculação hídrica e surgem no corpo hídrico, rotineiramente, em baixa concentração e em uma frequência irregular. A identificação destes indivíduos é considerada difícil, devido à alta complexidade de análises laboratoriais, custos elevados e demanda de longos períodos para atingir os resultados.

### **1.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

O Processo de Tratamento de Esgotos é determinado a partir de algumas condições cruciais: nível de eficiência desejada para o efluente final, área disponível, custo e complexidade de operações e processos, condicionantes ambientais exigidas no local da unidade, produção e disposição de lodos e dependência de insumos externos (MMA, 2009).

Sabe-se que o efluente tratado ao ser lançado no corpo receptor deve estar de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução do CONAMA nº 357/05 e 430/2011. A Resolução nº 357 enquadra os corpos d'água, de acordo com os usos preponderantes, sendo:

- Águas doces: classe especial e 1 a 4;
- Águas salobras: classe especial e 1 a 3;
- Águas salinas: classe especial e 1 a 3.

Além do enquadramento, a Resolução 357 (CONAMA, 2005) estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes. Essas restrições e exigências legais existem para que não haja mudança de enquadramento devido ao lançamento inadequado de efluentes.

Segundo Von Sperling (2014), os métodos de tratamento são divididos em operações e processos unitários, e a integração destes compõem o sistema de tratamento.

Os níveis de tratamento são usualmente classificados de acordo com o nível de eficiência: preliminar, primário, secundário e terciário.

#### **1.4.1 Tratamento preliminar**

O Tratamento preliminar é responsável pela remoção, por processos mecânicos ou físicos, de sólidos finos e grosseiros e areia presentes no esgoto afluente. Esta etapa possui o objetivo de evitar o acúmulo de sólidos grosseiros e materiais inertes e abrasivos nas tubulações e demais unidades da ETE. O tratamento preliminar inicia-se no gradeamento onde os sólidos grosseiros são retidos, de acordo com suas características e dimensões, nas grades. Sua remoção pode ser manual ou mecanizada (MMA, 2009).

Os sólidos predominantemente inorgânicos, como a areia, silte, argila, pequenas pedras e outros materiais inorgânicos, são separados do afluente nos desarenadores ou caixas de areia. Os desarenadores são dimensionados com tempos de retenção pequenos para selecionar o material sedimentado a velocidades altas. A areia e os sólidos grosseiros removidos geralmente são acondicionados em caçambas e encaminhados para disposição final em aterro sanitário (MMA, 2009).

### **1.4.2 Tratamento primário**

Apesar da remoção dos sólidos feita pelas operações unitárias anteriores, o esgoto possui ainda alta carga poluidora. Por isso, nesta etapa usam-se decantadores primário (principalmente), responsável por processos de ação física de sedimentação das partículas em suspensão. Lagoas anaeróbias/reactores anaeróbios podem ser aplicadas, e nessas, as bactérias proliferam em ambiente anaeróbio para a decomposição da matéria orgânica presente no esgoto (MMA, 2009).

Nos decantadores primários utiliza-se, em alguns casos, adição de agentes químicos que promovem a coagulação e floculação através da formação de flocos de matéria poluente que são facilmente decantáveis. Este procedimento é chamado tratamento quimicamente assistido (TQA). A eficiência desse processo pode chegar até 60%, dependendo do tipo de tratamento e da operação da ETE (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

### **1.4.3 Tratamento secundário**

O tratamento secundário destina-se à degradação biológica de compostos carbonáceos, podendo ser do tipo lodos ativados ou reatores biológicos. Esta etapa é constituída de tanques ou reatores com grande quantidade de microorganismos aeróbios ou anaeróbios que consomem a matéria orgânica existente. O efluente que sai destes tanques contém uma grande quantidade de microorganismos, sendo sua parte excedente ou inativa, direcionada para um processo de sedimentação nos decantadores secundários, onde se formam os chamados lodos secundários (MMA, 2009; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

O tratamento secundário possui uma eficiência que pode chegar no mínimo 95%, dependendo da operação da ETE, ou seja, apresenta um reduzido nível de poluição por matéria orgânica, podendo ser despejada diretamente no corpo receptor (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

### **1.4.4 Tratamento terciário**

O tratamento terciário é exigido quando o tratamento secundário não remove nitrogênio e fósforo ou quando há necessidade de desinfecção das águas residuárias para atender as exigências do órgão ambiental. A remoção de nitrogênio é normalmente

realizada no processo de lodos ativados (processos de nitrificação e desnitrificação). Geralmente, a remoção convencional de fósforo é realizada por meio de tratamento químico, utilizando-se sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outro coagulante (MMA, 2009).

A desinfecção dos esgotos domésticos com cloração, remove organismos patogênicos, contribuindo significativamente na redução de odores em estações de tratamento de esgoto sendo um dos processos artificiais de menor custo e elevado grau de eficiência. Atualmente existem outros métodos como a ozonização que é bastante dispendiosa a radiação ultravioleta, que possui restrições de aplicabilidade (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2012).

## **1.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

O saneamento básico e, em especial, o tratamento de esgotos sanitários e suas redes de coleta e destino, possui grande visibilidade junto à comunidade técnico-científica e também à população em geral, devido a importância e os benefícios deste serviço para saúde humana e para o meio ambiente.

As estações de tratamento de esgotos (ETE's) possuem diversas características que contribuem para a diminuição dos impactos dos esgotos brutos, como a prevenção a processos de depleção de oxigênio e eutrofização nos corpos hídricos, impede o lançamento de substâncias tóxicas que podem provocar danos a biota e à saúde humana (GUTIERREZ, 2014).

Entretanto, as ETE's também causam impactos ambientais, sendo necessário atenção especial nos aspectos construtivos e, principalmente, operacionais, pois demandam de alto consumo de energia, podem causar contaminações eventuais no solo e na água, fazem uso de compostos químicos, emitem gases para a atmosfera e produzem resíduos sólidos e líquidos ao longo do tratamento (GUTIERREZ, 2014).

Os métodos de tratamento presentes nas ETE's dividem-se em operações e processos unitários, e a integração destes, compõe o sistema de tratamento. Desta maneira, fazem-se necessários instrumentos de avaliação ambiental que caracterizem os impactos positivos e negativos associados a cada unidade dos sistemas, em função do consumo de recursos e da geração de subprodutos, a fim de se tomar as melhores

decisões em relação à quais sistemas adotar, fomentando a sustentabilidade dos mesmos (LINS, 2010).

Diante das atividades impactantes das ETE's, é de grande relevância a aplicação de metodologias de identificação de impactos que busquem propor medidas mitigadoras e preventivas. Essas práticas proporcionarão uma redução de impactos ambientais decorrentes de suas atividades, bem como a melhora da sua relação socioambiental com a comunidade, na prevenção de acidentes e otimização do consumo de energia (LA ROVERE, *et al.*, 2002).

### **1.5.1 Métodos de avaliação e identificação de impactos ambientais**

No estudo de avaliação de impactos ambientais, existem diferentes métodos, que são escolhidos de acordo com o nível de detalhamento das informações coletadas para a aplicação da metodologia. De acordo com Bastos & Almeida (2006) essas metodologias são construídas para comparar, organizar e analisar informações sobre impactos ambientais de um projeto. Embora existam diversos métodos, nenhum deles consegue abranger todas as atividades necessárias para avaliação completa dos impactos ambientais.

A combinação de dois ou mais métodos bem como adaptações em métodos existentes também pode ser aplicado para tornar a avaliação mais completa (ALMEIDA, 2002 apud LINS, 2010).

A seguir são apresentados métodos de avaliação e identificação de impactos ambientais usados na pesquisa.

#### **Método de listagem (check-lists)**

Segundo Bastos & Almeida (2006) essa técnica consiste na identificação e enumeração dos impactos, a partir de um diagnóstico ambiental nas áreas do meio físico, biótico e antrópico. Como vantagem, seu emprego imediato na avaliação qualitativa de impactos mais relevantes. Porém, desvantajoso, pois não considera as relações causa-efeito entre os impactos, sendo considerada adequada para avaliações preliminares.



## Matrizes de interação

Dentre os métodos de avaliação de impactos ambientais (AIA) a matriz de interação, também conhecida como Matriz de Leopold, é a mais difundida no país. Segundo Tommasi (1994), o uso da Matriz de Leopold permite uma rápida identificação, ainda que preliminar, dos problemas ambientais envolvidos em determinado processo, também permite identificar para cada atividade, os efeitos potenciais sobre as variáveis ambientais.

SUREHMA/GTZ (1992, apud Stamm (2003) cita as vantagens desse método: a abrangência das interações e a forma como os resultados são exibidos, bem como o caráter multidisciplinar e sua simplicidade de elaboração, reduzindo os custos de projeto. Em contrapartida, as desvantagens se encontram na dificuldade de distinção entre os impactos diretos e indiretos, a dificuldade de mesurar os pesos, a não identificação dos aspectos espaciais dos impactos e a dinâmica dos sistemas ambientais analisados.

Esta técnica consiste em uma tabela dispostas em linhas e colunas. Nas linhas localizam-se as atividades do empreendimento e nas colunas os fatores ambientais. Todos estes dados são categorizados de acordo com as atividades desenvolvidas no empreendimento de estudo, segundo a etapa que se encontra: implantação e/ou operação (BRAGA, *et. al.*, 2005).

Dessa maneira há a relação das ações com fatores ambientais, através do uso de indicadores que qualificam os impactos de cada ação através do cruzamento das linhas com colunas, preservando as relações causa-efeito. A partir disso, determina-se o potencial de impactos negativos e positivos, proporcionando a fixação, medidas mitigadoras de impactos negativos ou potencializadores de impactos positivos nos meios físico, biótico e antrópico (LEOPOLD, 1971, apud PARIZOTTO, 2011).

No ponto correspondente ao cruzamento entre as linhas e colunas são inseridos diversos parâmetros de avaliação impacto ambiental, que são classificados quanto a natureza (positivo/ negativo), ordem, magnitude (reversível/ irreversível), probabilidade de ocorrência (alta/ média/ baixa), abrangência (local/regional/estratégico) e frequência (ocasional/raro de ocorrer/permanente) (SÁNCHEZ, 2013).

## 1.6 IMPACTOS RECORRENTES NAS ETES

O tratamento de esgotos causa impactos ao meio ambiente. Embora as tecnologias de tratamento busquem a proteção ambiental e da saúde pública, essas devem ser bem administradas a fim de minimizar os potenciais impactos associados.

De um modo geral, os impactos em uma ETE podem ser classificados em positivos e negativos. No quesito ambiental, dentre os positivos, são a proteção ambiental de mananciais e solos, remoção ou redução de substâncias nocivas presentes nos esgotos, a prevenção ao assoreamento de rios e cursos d'água por materiais em suspensão e particulados, bem como a preservação dos aspectos sanitários e combate na depleção da flora e fauna aquática (KLIGERMAN *et al.*, 1999).

Os impactos negativos estão ligados a problemas de emissões de gases poluentes atmosféricos e de maus odores, decorrentes da alta concentração de matéria putrescível e exposição a céu aberto de grandes volumes de esgoto bruto, ainda, da produção de ruídos devido ao maquinário de bombeamento e tratamento, da produção de resíduos sólidos que são destinados a aterros sanitários, tais como areia, detritos, espuma e do lodo, este último, dependendo da população atendida, em grandes quantidades, dentre outros (KLIGERMAN *et al.*, 1999).

Souza & Salvador (1997, apud Brostel & Souza, 2005) relacionaram os seguintes impactos sociais positivos das ETE's nas fases de implantação e operação, os quais são a geração de empregos, melhoria nos índices de saúde pública, melhoria na qualidade de vida, melhoria na qualidade ambiental. Já os impactos negativos incluem a geração de ruídos, formação de material particulado e aerossóis na região, o aumento do tráfego de veículos, desvalorização dos imóveis próximos às ETE's, odores, aumento das tarifas dos serviços de saneamento e proliferação de insetos.

## 1.7 LODO DE ETE: GERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

O lodo de esgoto é classificado de acordo com as diversas etapas existentes no seu tratamento. Nos tratamentos convencionais são identificados lodo primário, lodo secundário ou biológico e lodo terciário, já nas fases que são adotados o uso de produtos químicos, origina-se o lodo químico (NUNES, 2008). As etapas do tratamento de esgotos removem diversos resíduos, como materiais gradeados e areia, retirados no tratamento preliminar. No entanto, o principal subproduto do tratamento de esgotos é o lodo primário, sólidos gerados no processo de tratamento físico de esgotos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) enquadra o lodo de esgoto como resíduo sólido, de Classe IIA – não inerte<sup>1</sup>. A definição de resíduos sólidos apresentada na NBR 10.004 (ABNT, 2004), inclui, entre outros materiais, os lodos provenientes de tratamento de água e os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Nebra (2007) distingue o termo “lodo” do termo “biossólido”, sendo o primeiro utilizado para os sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgotos antes de passar pelo tratamento adequado, e o segundo referente ao resíduo resultante do tratamento apropriado para possível reutilização do lodo, destacando o potencial uso benéfico para aproveitamento de matéria orgânica, nutrientes e outras qualidades que valorizam o seu uso em setores produtivos diversos, ao invés da disposição final improdutiva como, por exemplo, em aterro sanitário.

O lodo primário é composto principalmente de sólidos em suspensão presentes no esgoto que foram sedimentados e retirados do fundo do decantador primário, na etapa primária de tratamento. Segundo Metcalf e Eddy (2016), o lodo primário é comumente cinza escuro ou negro, viscoso e possui um odor extremamente desagradável. O teor de sólidos (SS) do lodo primário está na faixa de 2% a 6%, e a produção é da ordem de 35g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> a 40g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> (ANDREOLI, 2001).

O lodo secundário, também conhecido como lodo biológico, é produzido nos processos de tratamento biológico e sedimentado em seus decantadores secundários. Este lodo é a própria biomassa, formada a partir do alimento presente no efluente rico em matéria biodegradável. Quando provenientes dos processos de lodos ativados convencionais, geralmente contêm o teor de sólidos entre 0,6 e 1,0 % e uma produção típica de 25 g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> a 35 g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> (ANDREOLI, 2001).

Os autores Metcalf e Eddy (2003) destacam que o lodo secundário possui aparência de flocos marrons com um leve odor de “terra” e tende a se tornar séptico com o tempo, passando a apresentar um forte odor de putrefação.

Durante o tratamento de esgotos é comum a mistura do lodo primário e do lodo secundário em diversas estações de tratamento de esgotos. Neste caso, o lodo é denominado *lodo misto* e apresenta características peculiares que variam com a fase de

---

<sup>1</sup>“Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I- Perigosos ou de resíduos classe IIB – Inertes, nos termos desta norma. Os resíduos classe IIA- Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.” (ABNT, 2004, p.5)

tratamento em que os lodos primários e secundários se encontravam antes do encaminhamento ao tratamento conjunto.

O lodo químico é originado em estações que adotam etapas de tratamento físico-químicas de remoção de matéria orgânica, como por exemplo, as que utilizam tratamento primário quimicamente assistido (TPQA ou CEPT). Segundo Cassini (2003, apud FIGUEIREDO, 2009), estes processos apresentam uma produção de lodo próxima de 20% maior que o tratamento aeróbio e 100% superior à de processos combinados (anaeróbio + aeróbio).

Ao empregar o sulfato de alumínio como coagulante, estima-se que o lodo removido do decantador do TPQA apresenta de 60 g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> a 70 g SS.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>, com 65% a 68% de fração volátil. O volume produzido fica na ordem de 2,0 a 7,0 L.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>. Quando o coagulante utilizado é o cloreto férrico, a produção de lodo aumenta em cerca de 10% a 12% se comparado ao sulfato de alumínio (TSUTIYA *et al.* (2001) apud FIGUEIREDO, 2009). Já o lodo terciário é oriundo do tratamento terciário e suas características podem se assemelhar com as dos lodos primário, biológicos ou químicos ou ainda possuir características específicas, de acordo com o processo de tratamento adotado.

### **1.7.1 Composição e tratamento do lodo de ETE's**

Apesar de ser classificado como sólido, o lodo de esgoto possui cerca de 95% de água, sendo 5% restantes possuidores de características diversas, que variam de acordo com o afluente introduzido na ETE (ARAUJO, 2008). Em geral, ele é composto de componentes orgânicos, nutrientes, patogênicos e metais, podendo conter, ainda, compostos tóxicos e em geral possuem baixíssimo teor de sólidos.

O aspecto físico do lodo se assemelha à matéria orgânica “fresca”, e isso contribui para o aumento do seu potencial de putrefação revelando duas características negativas do lodo fresco relacionadas a produção de odores e proliferação de microrganismos patogênicos, fatores que contribuem para a putrefação da matéria (MALTA, 2001).

Devido a estas condições é necessário que haja um processo de tratamento e disposição adequada do lodo de esgotos. Este processo possui como objetivo a redução de microrganismos patogênicos e a eliminação de maus odores devido à redução do processo de biodegradação, que atua sobre a matéria volátil. O tratamento contribui

também para desumidificação do lodo, separando a água contida no lodo bruto dos sólidos levando a desidratação do resíduo e, com isso, promove a redução do volume de lodo a ser removido diariamente das Estações de Tratamento de Esgotos (SILVA, 2006).

A escolha da forma de tratamento e de destino final depende, dentre outros fatores, de seu volume e características físicas, químicas e biológicas, elementos estes que influem diretamente no custo. Uma das etapas que mais oneram e impactam no gerenciamento do lodo é o seu transporte, pois geralmente o lodo possui grandes volumes e alto teor de umidade. Dessa forma, o lodo deve ser submetido a uma desidratação que irá reduzir o volume e conseqüentemente o custo de disposição.

Os sistemas de tratamento são constituídos de diversas combinações de operações e processos unitários. Segundo Andreoli (2001) as etapas para o tratamento do lodo e seus respectivos objetivos são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1 - Etapas intermediárias do tratamento do lodo e seus principais objetivos.**

<b>Etapas</b>	<b>Principais Objetivos</b>
Condicionamento	Etapa preliminar, aumenta tamanho das partículas do lodo
Adensamento ou espessamento	Retirada de umidade – diminuição de massa e volume
Estabilização	Remoção de matéria orgânica e de patógenos
Desaguamento ou desidratação	Remoção da umidade
Higienização	Remoção de patógenos
Disposição final	Destinação final

Fonte: Andreoli (2001), adaptado pelo autor.

## **Condicionamento**

O condicionamento é um processo preparatório aplicado a montante da unidade de desidratação, no qual são adicionados produtos químicos ao lodo, visando à diminuição da umidade. Para isso, faz-se o uso de processos mecânicos, que apesar de elevar os custos, não requerer grandes áreas de instalação. Esta etapa inicia-se com a adição de produtos químicos inorgânicos ou orgânicos que enfraquecem as forças químicas ou físicas que atuam nas partículas coloidais em suspensão gerando uma desestabilização do lodo. Com isso, as partículas sólidas pequenas se agregam as maiores formando os flocos, proporcionando a separação da fase líquida/sólida da torta (LINS, 2010).

Segundo Gonçalves *et al.* (2001) o acondicionamento químico inorgânico aumenta consideravelmente a massa de lodo a ser gerenciada na estação, pois este tipo de coagulante para obtenção de uma resposta satisfatória exige a adição de grandes

quantidades que acabam se tornando parte da torta de lodo produzida. Além disso, este tipo de acondicionamento contribui para a redução do potencial de queima para incineração.

## **Adensamento**

Conforme destaca Jordão (2011), a finalidade principal do adensamento é reduzir o volume do lodo que será processado nas etapas posteriores do tratamento, reduzindo os custos de implantação e operação das unidades de digestão e secagem. Desta forma, o adensamento do lodo provoca o aumento da concentração de sólidos a partir da remoção de parte da água presente no lodo, processo esse que ocorre por meio dos adensadores. Os tipos de adensadores mais utilizados existentes são por gravidade, por flotação de ar dissolvido e mecanizados, como as centrífugas e as prensas desaguadoras (ANDREOLI, 2001).

### ***Adensadores por gravidade***

O adensamento do lodo por gravidade funciona através da sedimentação por zona em uma ação semelhante aos decantadores nas ETE's, onde o lodo se deposita no fundo do adensador proporcionando a separação da fase líquida/ sólida. Assim, o lodo se concentra no fundo e a espuma flutua na superfície sendo raspada para a bandeja de espuma e direcionada para um poço específico. Através do movimento de rotação e de direcionamento das hastes do adensador, o lodo permanece armazenado por várias horas dentro de uma unidade concentradora de lodo. Uma vez atingido o volume máximo de armazenamento deste local, é acionada a bomba de lodo adensado recalçando-o para a próxima etapa de tratamento (SILVA, 2006).

### ***Adensadores por flotação***

O adensamento por flotação objetiva a separação da fase líquido-sólido através do uso de ar difuso pressurizado responsável pela injeção de bolhas de ar na massa líquida. Deste modo os componentes que se desejam separar e adensar como sólidos em suspensão, óleos ou graxas e fibras de baixa densidade são facilmente removidos através da despressurização e conseqüente arraste das bolhas de gás no interior da mistura que, aderem às partículas sólidas e as encaminha para a superfície. Nos processos de lodos ativados o adensamento por flotação possui alta demanda, pois o

adensamento por gravidade não responde de forma eficiente (GONÇALVES *et al.*, 2001).

## **Estabilização**

As principais técnicas de estabilização do lodo fazem uso de procedimentos de cunho químico ou biológico, sendo elemento crucial para escolha, as características de tratamento dos efluentes e tipo de lodo a ser tratado (SPERLING, 2011). Os processos mais comuns para tratamento do lodo são apresentados a seguir:

### ***Digestão Anaeróbia***

A digestão anaeróbia dos lodos é um processo biológico de degradação da matéria orgânica. Ela ocorre através da fermentação de bactérias anaeróbias produtoras de metano em um ambiente fechado e ausente de ar. É um processo lento que necessita de determinadas condições de temperatura, concentração de sólidos, e de certos equilíbrios físico-químicos (relação acidez/alcalinidade e pH). A digestão anaeróbia gera dois produtos: o lodo digerido e o gás metano. Tais elementos se má condicionados, são considerados ofensivos ao meio ambiente e possuidores de características desagradáveis, mas ao serem corretamente manuseados, se transformam em dois produtos que podem se reintegrar harmoniosamente à natureza e gerar ganhos econômicos (SILVA, 2006).

### ***Digestão Aeróbia***

Neste tipo de tratamento ocorre a biodegradação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios, através da adição de ar ou oxigênio ao lodo contido em tanques abertos. As vantagens desse tipo de digestão são baixo custo de implantação, facilidade na operação e produção de lodo estabilizado sem odores fétidos. As principais desvantagens da digestão aeróbia são o alto consumo de energia para o fornecimento de oxigênio ao reator e produção de lodo com baixa capacidade para desidratação. A digestão aeróbia não é considerada eficaz na redução de microrganismos patogênicos (BITTON, 2001).

### ***Compostagem***

Esta técnica se enquadra no processo biológico aeróbio e pode ser definida como uma bioxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo. A compostagem é caracterizada pela produção de CO<sub>2</sub>, água e formação de matéria orgânica estável. Segundo Fernandes e Souza (2001), do ponto de vista operacional, o processo é desenvolvido por uma população diversificada de microrganismos e possui duas fases distintas, sendo a primeira de degradação ativa e a segunda de maturação ou cura. Uma das grandes diferenças da compostagem em comparação com outros métodos de estabilização é que ela se realiza em meios sólidos. O produto final estabilizado é conhecido como húmus e é, largamente, utilizado na agricultura.

### ***Tratamento Químico***

A estabilização química é obtida com a adição de produtos que atacam os microrganismos patogênicos e oxidam quimicamente a matéria orgânica. Nesse processo, é comum o uso de produtos como a cal, que eleva o pH destruindo a maior parte dos microrganismos patogênicos. O uso de cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio, também podem ser utilizados no processo, mas em menor escala (ANDREOLI, 2001). Entretanto, segundo Von Sperling (2001) o acondicionamento químico possui algumas desvantagens como o aumento considerável do volume do lodo, diante das altas quantidades de cal introduzida na torta e contribuição para a redução no potencial de queima para incineração do lodo.

### ***Tratamento Térmico***

Os processos de secagem térmica, de oxidação úmida e a pasteurização também possuem a finalidade de estabilização do lodo. As principais vantagens da secagem térmica são o custo reduzido de transporte do lodo seco, elevada redução de organismos patogênicos e possibilidade de estocagem e venda de produto como biofertilizante. Todavia, o elevado custo de energia torna este processo de difícil utilização (SILVA, 2006).



## **Desaguamento ou Desidratação**

A desidratação dos lodos digeridos é uma operação unitária física e tem como objetivo retirar parte da água contida no lodo, reduzindo assim o teor de umidade do mesmo (ANDREOLI *et al*, 2006). Os principais processos utilizados na desidratação do lodo são:

1. **Naturais:** Leitos de secagem; Lagoas de lodo.
2. **Mecânicos:** Centrífugas; Filtros prensa.

Observa-se que o método a ser utilizado deverá ser selecionado de acordo com o tipo de lodo que será desaguado, as características desejadas para o final do desaguamento, o espaço disponível para implementação do sistema e, também, o tipo de destino final que será dado ao lodo (JORDÃO, 2011; METCALF EEDDY, 2016).

Segundo Bielschowsky (2014) para estações de tratamento que dispõem de grandes áreas de implantação e atendem uma pequena população, as lagoas de lodo e os leitos de secagem são as melhores alternativas. Já os processos de desaguamento mecanizados possuem maior demanda em locais de menor área para sua instalação e com menor influência climática. Para este processo há também vantagens peculiares como: a menor exalação de odores e conseqüentemente a menor atração de vetores, possuindo, por sua vez, um maior custo e produção de lodos com menores teores de sólidos.

### ***Leitos de secagem***

Os leitos de secagem são unidades, geralmente em formato retangular, construídas para armazenar lodos dos digestores ou de unidades de oxidação. Nele se processa a redução de umidade através da drenagem e da evaporação da água liberada durante o período de secagem (JORDÃO, 2011).

O funcionamento dos leitos de secagem é baseado em um processo natural de perda de umidade que se desenvolve devido aos seguintes fenômenos: liberação de gases dissolvidos, liquefação, devido a diferença de peso específico aparente do lodo digerido e da água, a evaporação natural da água devido ao contato íntimo com a atmosfera e evaporação devido ao poder calorífico do lodo (LINS, 2010).

Os tanques de armazenamento geralmente possuem uma base de alvenaria ou de concreto. Para o escoamento do líquido que flui do lodo, tem-se uma camada drenante, constituída de brita, areia e placa de concreto perfurada. O lodo é lançado sobre este

leito e depois de seco, a torta de lodo pode ser removida mecânica ou manualmente (CORDEIRO, 2001).

A drenagem do lodo inicia-se imediatamente após a disposição do mesmo no leito de secagem e chega a durar de 24 a 48 horas. Ao longo deste intervalo de tempo a altura do lodo reduz em aproximadamente 60 %. A secagem propriamente dita começa somente após o total desaguamento do lodo, sendo controlada pelos ventos, radiação e insolação solar, temperatura e das características do lodo (LINS, 2010).

Em condições normais de secagem, o lodo estará seco e poderá ser removido do leito de secagem após um período de 12 a 20 dias, quando a umidade atinge de 70 a 60% (JORDÃO e PESSOA, 2011).

### *Lagoas de Lodo*

O uso de lagoas de lodo ou de secagem é recomendado para locais de clima quente e árido, pois a secagem é realizada através da radiação solar e as altas temperaturas. O processo de desaguamento em lagoas de lodo é baseado na drenagem e na evaporação da água existente no lodo e resultando em um composto seco. Segundo Fontana (2004) as lagoas de lodo possuem em média um metro de profundidade, porém existem lagoas com até três metros de profundidade. A profundidade e a área superficial da lagoa dependem das condições de precipitação, evaporação, concentração e o volume de lodo.

Segundo Richter (2001), as técnicas de desidratação natural do lodo estão sendo cada vez mais utilizadas apenas em ETE's de pequeno porte, com capacidade inferior a 200 L.s<sup>-1</sup> devido principalmente, a necessidade de grandes áreas para a instalação dos leitos. Para diminuir a área necessária ao desaguamento indica-se investir em adensadores mais eficientes, para que a concentração de sólidos seja o maior possível, ou seja, adequar a carga drenada e condicionar o lodo, antes de encaminhá-lo ao leito de secagem, por exemplo.

O desaguamento por processos naturais, como leitos de secagem, tende a ser substituído cada vez mais por processos mecanizados, tais como centrífugas tipo *decanter*, filtros prensa de esteira, filtro prensa de placas e filtros a vácuo (PEREIRA, 2011).

### ***Centrífuga***

O método de centrifugação age através do processo de separação sólido-líquido do lodo, gerada pela ação da força centrífuga. A unidade de centrifugação possui um tambor cilíndrico que gira em alta rotação para produzir essa força. Ao entrar na centrífuga, o lodo úmido se adere à parede interna do equipamento. No interior da centrífuga existe uma rosca transportadora instalada de tal forma que mantém apenas um pequeno espaço livre entre ela e a parede cilíndrica e gira com velocidade menor que a do tambor. Esta diferença de velocidade permite o carregamento dos sólidos até a zona de descarga (ANDREOLI, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2006).

Nas centrífugas desaguadoras o teor de sólidos da torta resultante dessa operação e sua eficiência de remoção de água dependem, principalmente, do tipo de lodo e da adição de produtos químicos, como polímeros como os polieletrólitos para desestabilizar os colóides. Ao fim da centrifugação os teores de sólidos no lodo seco variam de 15 a 30% (LINS, 2010).

Metcalf e Eddy (2003) indicam as principais vantagens da centrífuga sendo o controle de odor, o acionamento de ligar e desligar de forma rápida, a produção de tortas relativamente secas, a baixa relação capital-investimento e a utilização de pequenas áreas para seu correto desempenho. Outra vantagem é o uso das centrífugas é o uso do maquinário em processos que objetivam o desaguamento ou o adensamento, porém com as devidas mudanças nas configurações (sendo necessário informar ao fabricante no momento da compra), oferecendo, portanto, uma vantagem de manutenção e de operação na ETE.

Em contrapartida, como principais desvantagens, são apontados: o desgaste das roscas (que são um problema potencial de manutenção), a necessidade de remoção de areia, a possível necessidade de um triturador de lodos anterior à unidade e a necessidade de manutenção especializada (BIELSCHOWSKY, 2014).

### ***Filtro de prensa***

Os filtros de prensa são filtros de pressão e possui placas de ferro como material, entre os quais se prendem nos panos filtrantes. Caso o intuito seja a reutilização deste material os filtros utilizados são de tecidos e se a opção for pela troca rotineira, utilizam-se papel para facilitar o descarte. O filtro prensa opera em batelada e para seu

manuseio é necessário à contratação de operadores capacitados e com alto grau de confiabilidade (LINS, 2010).

O lodo é pressurizado durante um ou duas horas, sendo depois removido manualmente no estado sólido. Durante a operação, a umidade cai de 95% para 65%, e seu volume se reduz a um sétimo do valor inicial. Ao longo deste processo de desaguamento é comum a adição de  $\text{FeCl}_3$  e cal no lodo, para facilitar o a desumidificação (LINS, 2010).

Este equipamento possui diversas vantagens, mas a que mais se destaca é produção de torta com altas concentrações de sólidos. Já a desvantagem está no processo descontínuo, devido ao fato de ter a interrupções do sistema e a consequente limpeza e remoção contínua de tortas de lodo.

### **Higienização**

O lodo de esgoto possui, em sua constituição, níveis de patogenicidade oriundos de parasitas ou ovos de helmintos que muitas vezes permanecem junto à matéria orgânica sólida. Apesar das ações de eliminação de patógenos provenientes dos processos de estabilização do lodo, tais como a digestão biológica, química ou térmica, muitos parasitas intestinais presentes no lodo e, sobretudo, seus ovos permanecem junto ao composto. Os processos de digestão convencional ainda estão aquém da eliminação destes microrganismos e por isso, há a necessidade de uma etapa complementar que visa a redução dos níveis de risco à saúde da população e age de acordo com as exigências legais para utilização posterior do lodo. Esta etapa é denominada de higienização (ANDREOLI, 2001; FERNANDES *et al.*, 1999).

No quesito de higienização, a Usepa (1997) promulgou uma norma que define duas classificações (A e B) para o lodo de acordo com sua qualidade microbiológica. Sendo o lodo de classe A, com uso irrestrito e que garanta uma concentração patogênica abaixo do limite de detecção, caso seja submetido à etapa de higienização. Na classe B, o lodo passa por processos convencionais de estabilização, restringindo o seu uso na agricultura, devendo apresentar concentração de coliformes fecais inferior a  $2.10^6$  cfu.gST<sup>-1</sup>.

Os mecanismos de higienização do lodo podem ser realizados por via térmica, química, biológica ou por radiação Beta e Gama (ANDREOLI, 2001).

### ***Calagem***

A calagem por cal, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), é o processo de higienização por meios químicos, a qual ocorre a adição de cal ao lodo para reduzir os microrganismos e prevenir odores através do aumento do pH para 12. A cal hidratada fica em contato com o lodo digerido por aproximadamente 30 minutos, tempo suficiente para a esterilização dos patógenos (TEIXEIRA PINTO, 2001).

O método de dosagem da cal varia de acordo com as características do lodo, estando entre 190 a 350 kg de  $\text{Ca(OH)}_2$  por tonelada de sólidos secos para lodos ativados, e de 125 a 225 para lodo digerido. Já o lodo líquido tratado com cal é desidratado de forma fácil e a partir daí é encaminhado para a disposição final (TEIXEIRA PINTO, 2001).

### ***Secagem Térmica***

A secagem térmica é promovida a partir da evaporação do líquido existente no lodo através do uso de energia térmica, atuando de forma que não danifique a matéria orgânica existente (ANDREOLI *et al.*, 2006). Esse processo objetiva a redução da umidade do lodo e a esterilização de organismos patogênicos sem alterar significativamente a concentração dos sólidos totais do lodo.

Os principais aspectos positivos da secagem térmica do lodo são: a redução significativa do volume de lodo podendo atingir de 80 a 90% de teores de sólidos; a redução dos custos de transporte e estocagem (quando for o caso); a estabilização do lodo, que fica praticamente livre de patógenos, ou seja, é considerado como lodo classe A; a manutenção das propriedades agrícolas do lodo, que pode, inclusive, ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista; e a possibilidade de o lodo ser incinerado ou disposto em aterro sanitário (ANDREOLI, 2001; JORDÃO, 2011).

Já as principais desvantagens dos secadores térmicos são: o elevado investimento inicial e o alto consumo de energia, além da liberação de gases e odores para a atmosfera e a geração de ruídos (ANDREOLI, 2001).

## 1.8 TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO E APROVEITAMENTO DO LODO: USO NUTRICIONAL PARA PLANTAS

Segundo Metcalf e Eddy (2016) o processamento, o reuso e a disposição final do lodo e dos biossólidos é visto como um grande desafio para os engenheiros no campo do tratamento de esgotos. Como já citado ao longo deste trabalho, a peça chave para a escolha da tecnologia apropriada de tratamento do lodo depende das características do mesmo que garantirá, ao final do processo, condições adequadas e satisfatórias para o destino final do lodo.

A tabela 2 indica os principais atributos que podem ser extraídos do lodo e suas utilizações possíveis.

**Tabela 2 - Principais componentes extraídos do lodo.**

<b>Produtos</b>	<b>Uso do produto</b>
Metano	Eletricidade, calor, combustível
Gases	Eletricidade, calor
Óleo, gorduras e graxas	Biodiesel, metano
Fósforo	Fertilizantes
Nitrogênio	Fertilizantes
Metais	Coagulantes
Material inorgânico	Material de construção
Compostos orgânicos	Produção de ácido orgânico
Inóculo	Produção de gás biohidrogênio
Proteínas cristalizadas, esporos	Produção de biopesticidas

Fonte: GWRC (2008) adaptado pelo autor.

As informações da tabela 2 mostram as particularidades benéficas na composição do lodo de esgoto. Os métodos mais usados são: uso agrícola dos elementos minerais; aproveitamento energético como, secagem solar, biogás e incineração; disposição em aterro sanitário e outras técnicas de recuperação e transformação.

O uso agrícola de lodo de esgoto ou biossólidos tem crescido, acentuadamente, em todo o mundo, principalmente em países em desenvolvimento, devido a alta demanda pelo aumento de produção agrícola, sem aplicação de fertilizantes sintéticos. O solo poderá ter maior ou menor beneficiamento nutricional, fato este que varia com as características do biossólido adicionado. Além disso o resíduo orgânico auxilia na recuperação de áreas degradadas e no reflorestamento (POLAT *et al.*, 2010; MODESTO *et al.*, 2009).

Os elementos que constituem o lodo variam com a origem, processo de tratamento usado e as diferentes épocas do ano. No geral o lodo de esgoto é rico em macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e micronutrientes (zinco, cobre ferro, manganês e

molibdênio), chegando a ter 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo (BETTIOL; CAMARGO, 2006; DIAS, 2012).

Portanto, o lodo quando utilizado como biofertilizante, possui notada valorização econômica e benefícios ambientais, pois a prática de reuso remove parcial ou totalmente o teor de nutrientes contido nos efluentes como, principalmente nitrogênio e fósforo. Com essa prática os nutrientes presentes retornam ao solo fechando o ciclo biológico, que retorna posteriormente ao início da cadeia. Ressalta-se que os elementos presentes no biossólido quase nunca retornam ao seu local original já que as populações geradoras desse esgoto se concentram em grandes centros urbanos (POLAT *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 2015).

O uso de lodo de ETE no solo deve obedecer uma recomendação agrônômica rigorosa, devido a presença de elementos prejudiciais como metais pesados, microrganismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos. O uso do lodo, portanto é limitado pela concentração destes contaminantes que podem causar riscos diretos ou indiretos à saúde humana e animal quando manuseados fora das normativas pertinentes (OLIVEIRA, 2015; SILVA, 2007).

No Brasil, a regulação legal da aplicação do lodo de ETE no solo é regido pela Resolução CONAMA 375/2006 (BRASIL, 2006b), que define os critérios e procedimentos para uso agrícola de lodo de esgoto gerados em estações de tratamento de esgotos sanitários e seus produtos derivados. Esta legislação prevê exigências necessárias para adquirir a permissão do uso de lodo em solos pelo órgão ambiental responsável.

A Resolução n° 375 (BRASIL, 2006b) cita ainda a condição necessária do lodo para uso no solo; as limitações locais e das exigências de solo na aplicação do lodo; determina as condições de uso do lodo e acompanhamento segundo projeto agrônômico; forma de carregamento, transporte e estocagem; o monitoramento contínuo (no solo, águas superficiais e subterrâneas) em locais de uso do resíduo; cita os procedimentos de redução de agentes patogênicos e de afastamento de vetores (PIRES, 2015).

Ainda em relação as normativas existentes no Brasil, a CETESB foi pioneira ao criar a norma P4.230 para aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação, editada em agosto de 1999. Esta norma foi elaborada com base, principalmente na normativa americana 40 CFR Part 503 (Code of Federal Regulations n° 40, Part 503 – Standards for the Use and Disposal of

Sewage Sludge), publicada em 1993, através da United States Environmental Protection Agency (EPA, U.S.A.), que disciplina o uso de biossólidos na agricultura no EUA.

Segundo a CETESB (1999), os pré-requisitos de qualidade microbiológica e parasitológica, de redução de vetores e de concentração de metais pesados. Especificamente sobre a redução de patógenos, o biossólido é dividido em duas classes: “Classe A”, resultante de processos de redução adicional de patógenos e a “Classe B”, resultante de processos de redução de patógenos. Estas classes serão descritas com detalhes a seguir:

### **Biossólidos Classe A**

Um lodo é considerado classe A se o processo adotado para o seu tratamento, quanto à redução adicional de patógenos, for aprovado pelo órgão de controle ambiental como capaz de produzir este efeito. Deve ainda ser analisado quanto à presença de coliformes fecais e *Salmonella sp*, no momento de seu uso ou disposição no solo agrícola ou no momento da entrega a terceiros responsáveis pela aplicação.

Para a EPA (2003), o lodo deve atender aos seguintes limites para a densidade dos organismos especificados:

- Densidade de coliformes fecais, densidade inferior a 1000 NMP.g<sup>-1</sup> de lodo seco;
- Densidade de *Salmonella sp*, densidade inferior a 4 NMP por 4g de lodo seco;
- Preencher uma das seis opções de processo previstas na regulamentação: tempo e temperatura, uso de calor e elevação do pH;
- Na verificação da redução adicional de patógenos, a concentração de vírus entéricos devem ser um valor menor que 1UFP por 4 g de lodo seco, os ovos de helmintos devem ser reduzidos a um valor menor que 1 ovo por 4 g de lodo;
- O tratamento que o lodo recebe deve ser enquadrado no *Process to Further Reduce Pathogens* (PFRP), que é análogo aos processos de redução adicional de patógenos recomendado.

Os lodos que atenderem estes requisitos podem ser comercializados ou distribuídos gratuitamente, aplicados em gramados e jardins residenciais, e não possuem restrições para acesso público nos solos que receberam este material (SERENOTTI, 2009).



A norma da CETESB (1999) exige a verificação de coliformes fecais e de *salmonella sp* para a classificação de biossólidos na classe A, diferentemente da norma EPA 40 CFR Part 503, que requer somente um dos dois parâmetros.

### **Biossólidos Classe B**

O lodo é classificado como classe B se a densidade de coliformes fecais do mesmo for inferior a  $2 \times 10^6$  NMP.g<sup>-1</sup> de sólidos totais. Para confirmação desta classificação, deve-se verificar, no mínimo, os seguintes itens:

- o processo adotado para seu tratamento visando a redução de patógenos tiver sido aceito pelo órgão ambiental ou;
- o resultado do monitoramento de coliformes fecais no lodo indicar que a média geométrica da densidade de coliformes fecais de sete amostras é inferior a  $2 \times 10^6$  NMP.g<sup>-1</sup> sólidos totais ou  $2 \times 10^6$  UFP.g<sup>-1</sup> sólidos totais.

O lodo classe B, após tratamento prévio, pode ser destinado para aplicação em granel, e pode ser aplicado em grandes culturas, reflorestamento e em locais que tenham acesso ao público normatizado (SERENOTTI, 2009).

### **Uso de lodo de ETE na indústria de fertilizantes**

O lodo de ETE possui elevados teores de matéria orgânica e de macro e micronutrientes, estes componentes permitem o uso deste resíduo como biofertilizante potencial, que pode beneficiar o solo complementando as características dos adubos químicos, ou até mesmo fornecer atributos não existentes nos fertilizantes químicos.

A utilização do biossólido como biofertilizante, em substituição aos fertilizantes industriais, traz economia de gastos econômicos e energéticos proveniente das próprias atividades de produção e de fertilização do solo. Caso depositado em aterros sanitários, decorrerá altos custos de manutenção e a energia que poderia ser aproveitada será perdida, além de proporcionar risco de contaminação de solos e lençóis freáticos (QUITANA, 2011).

O lodo de esgoto é rico em nitrogênio e fósforo que são essenciais para o desenvolvimento das plantas e obtenção de boa produtividade. Este material passa por diversos tratamentos e controles de qualidade, que garantem a sua higienização e eficácia para ser utilizado como fertilizante (QUINTANA, 2006).

Para o uso de biossólidos na indústria de fertilizantes foram desenvolvidos diversos estudos, dentre eles o plano diretor de uso/ disposição de lodo de ETE's na Região Metropolitana de São Paulo, através do Consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS (CEEJ), no ano de 1998. Este plano descreve as três possibilidades de uso de biossólidos na indústria de fertilizantes:

### **Fertilizante granulado complexo**

Este procedimento o biossólido e os sais minerais formam um produto único e homogêneo. Este produto será chamado organomineral caso possua teor mínimo de 25% de matéria orgânica e 12% de NPK ou pode ser chamado de mistura granulada complexa, se não atender o teor mínimo de matéria orgânica e possuir no mínimo 24 NPK.

Conforme descreve a CEEJ (1998), o processo de produção deste fertilizante segue etapas de alimentação de matéria-prima, secagem e classificação granulométrica do produto.

A matéria-prima é oriunda da torta potássica de lodo juntamente com fosfatos, sulfato de amônia, uréia, cloreto de potássio, ácido fosfórico e amônia. Na preparação desta torta há a adição de cal para estabilização do pH, seguida de choque osmótico com cloreto de potássio.

Em seguida ocorre as etapas de granulação, secagem e classificação granulométrica, chegando a produtos finais com granulometria entre 2,0 e 4,0 mm, isento de patógenos e com bom aspecto para fertilizante granulado.

Este fertilizante deve possuir propriedades químicas e físicas semelhantes ao fertilizante químico convencional, e sua aplicação no solo se dá sem qualquer equipamento especial ou mudança de rotina, que não haja diferenciação com fertilizante tradicional.

### **Mistura de fertilizantes minerais e orgânicos**

Estes produtos que apresentam forma de grânulos ou em pó, dependendo dos teores em matéria orgânica e NPK e podem também serem classificados como fertilizante mineral ou organomineral. O processo produtivo, baseia-se na mistura de componentes já granulados. Nesta cadeia o biossólido, após secagem térmica, passa a constituir uma nova matéria prima, única no mercado, com matéria orgânica granulada e

de grande valia para empresas misturadoras que dosam a porcentagem de fertilizantes minerais e orgânicos de acordo com a demanda de mercado. Segundo a CEEJ (1998), este processo possui grande potencial para destinação de lodo seco de ETE, entretanto não é muito usada atualmente, diante das dificuldades na obtenção de uma matéria prima orgânica.

### **Carga na formulação**

A indústria de fertilizante granulado complexo completa o peso com carga inerte, em pequenas quantidades 1 a 5% do total, que é conhecida como carga ou enchimento. É usual na produção acrescentar granilha (pedra moída inerte), mas caso a carga utilizada seja uma carga orgânica de biossólido seco, o seu volume pode ser ainda maior que a granilha, pois este agrega características positivas no teor de matéria orgânica e nutrientes. Apesar do rigor imposto pela normativa, agências brasileiras estão restringindo o uso do lodo na agricultura, diante da presença de patógenos e compostos orgânicos e inorgânicos com potencial tóxico, que podem causar contaminação ambiental (ABREU JUNIOR *et al.*, 2008). Acrescido a isso, há estudos recentes que questionam a presença de contaminantes como hormônios e antibióticos (PYCKE *et al.*, 2014) que podem prejudicar a saúde dos seres vivos, condenando assim, o uso do resíduo em áreas agrícolas. Uma das alternativas de destinação final propostas por estes estudos é a produção energética a partir do lodo (EGAN, 2013).

A discussão sobre a aplicação do lodo de ETE nos solos é ampla e possui pontos favoráveis e condenáveis. O fato é que este resíduo possui diversos nutrientes com valores agregados e passíveis de utilização. Sabe-se que a condição para o uso do lodo em área agrícola exige acompanhamento e monitoramento técnico, além de análises laboratoriais que descrevam as características gerais e detalhadas da amostra. Por isso, a aplicação de lodo em áreas agrícolas é uma alternativa viável, se o mesmo for devidamente condicionado, e desde que haja demanda de áreas de cultivo e que seja tomada medidas de prevenção e precaução em relação aos contaminantes e danos ambientais.

## 1.9 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO: SECAGEM DE LODO DE ETE

Atualmente, o lodo de ETE possui restrições e aspectos negativos que levam a problemas na área de saneamento básico. Por isso, o aproveitamento energético deste resíduo agrega inúmeros benefícios para a matriz energética brasileira, bem como, incentiva o gerenciamento e destino adequado do lodo no meio ambiente de forma, a proporcionar benefícios para a sociedade. Serão descritos a seguir diversas tecnologias de geração de energia elétrica a partir do lodo de ETE.

A secagem é um dos processos mais antigos e tradicionais utilizados pela humanidade. É classificada como uma operação unitária que visa eliminar a água, ou qualquer outro líquido, contido em um sólido, por meio de adição de calor que reduz o teor de umidade do material. Sua aplicação promove uma grande redução do volume, bem como de seu peso, permitindo melhor e maior capacidade de armazenamento e disposição final, além da eliminação dos microrganismos patogênicos e a redução de custos (SERENOTTI, 2009).

Em aspectos gerais a secagem é controlada pela transferência de calor e de massa entre a superfície do corpo. Esta transferência está intrinsecamente ligada aos aspectos externos que garantem temperatura e umidade relativa do ar ideais, e no conteúdo interno do material de secagem que reflete em parâmetros como: variação de umidade, pressão parcial, velocidade de secagem (SERENOTTI, 2009).

As duas técnicas de secagem de lodo mais usuais e que obtêm cerca de 50% sólidos secos são: a secagem térmica e solar. A secagem térmica atinge mais de 95% de teor de sólidos secos e seu funcionamento depende de combustível – geralmente fóssil – para aquecer o ar de secagem (FONDA E LYNCH, 2009; MUJUMDAR E ZHONGHUA, 2008). Os secadores térmicos possuem como desvantagem as emissões atmosféricas e o custo de energia gerada. Tipicamente, a energia requerida é de  $2627 \text{ kJ.kg}^{-1}$  de biossólido ou  $2595 \text{ kJ.kg}^{-1}$  de água ( $0,72 \text{ kW.kg}^{-1}$  água) para a secagem de lodos (FONDA; LYNCH, 2009).

A secagem solar está se tornando uma opção popular para secadores térmicos, pois, faz uso de energia renovável oriunda do Sol o que a torna viável e aplicável em várias partes o mundo (MATHIOUDAKIS *et al.*, 2013). Inicialmente, esta técnica era aplicada na forma de leitos de secagem, mas estudos recentes divulgaram um método que faz uso de estufas que promovem a mistura e ventilação do lodo. As chamadas ca-

sas de secagem verde (solar greenhouse drying) possuem baixo custo operacional e construção acessível, sem qualquer restrição climática para seu uso, além de gerarem baixas emissões de CO<sub>2</sub> e baixo consumo energético para sua operação (OM e ANIL, 2014).

### 1.9.1 Avaliação do recurso solar no Brasil

O território brasileiro possui um clima equatorial em boa parte do território. A localização de cerca de 92% do território brasileiro na zona intertropical e as baixas altitudes do relevo explicam a predominância de climas quentes, com médias de temperatura superiores a 20° C. Por possuir grande parte do território próximo da linha do Equador, não há variações significantes em relação a duração solar do dia, possuindo intervalos de tempo semelhantes para o dia e noite (IBGE, 2017).

Segundo Pereira et al. (2006), a menor irradiação global no Brasil é de 4,25 kWh.m<sup>-2</sup> (no litoral norte de Santa Catarina) e a maior é de 6,5 kWh.m<sup>-2</sup> (norte da Bahia). Em virtude disso, a irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro varia de 4.200 a 6.700 kWh.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>, superior às verificadas em outros países que hoje são expoentes do uso da energia solar: 900 a 1.250 kWh.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup> na Alemanha; 900 a 1.650 kWh.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup> na França; e 1.200 a 1.850 kWh.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup> na Espanha. Abaixo segue a figura 1 que mostra a irradiação solar direta no Brasil.

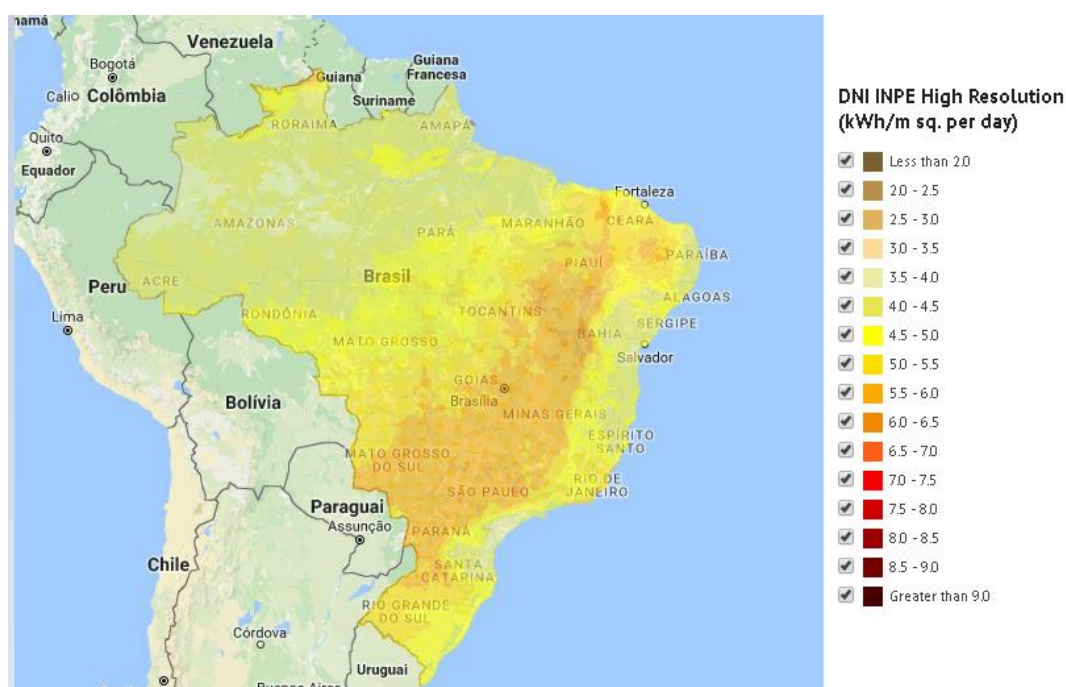


Figura 1- Irradiância solar direta do Brasil (KWh/m<sup>2</sup>/dia). Fonte: (SWERA, 2017)

Considerando as informações da figura 1, pode-se constatar que os maiores índices de radiação solar estão nos seguintes Estados: Bahia, Piauí, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Tocantins, Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Esta informação potencializa o uso da energia solar como uma alternativa para a secagem natural de lodos em ETE's.

### **1.9.2 Secagem solar natural**

A secagem natural ou ao sol consiste na exposição do produto ao sol em um local seco, que já foi anteriormente centrifugado ou filtrado. Os produtos a serem secos podem ser colocados em uma superfície homogênea que permita escoamento e movimentação constante do material de forma a manter a uniformização da taxa de perda de umidade (SERENOTTI, 2009 apud BIAGI *et al.*, 1992).

A secagem solar pode reduzir o teor de umidade para 5% de sólidos secos, diminuindo sua massa e volume, potencializa o poder calorífico do lodo, transformando-o em um combustível típico e elimina patógenos diante da exposição a altas temperaturas (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012).

O transporte, armazenagem, embalagem e comércio do lodo com o uso desta tecnologia se torna mais fácil e rentável. Por aumentar o valor calorífico do resíduo ele pode ser incinerado com ou sem combustível auxiliar, o possibilita o seu uso em sistemas de cogeração de energia elétrica. (STASTA *et al.*, 2006). Por outro lado, o processo é lento e depende das condições climáticas locais, além de exigir mão-de obra exclusiva para as operações de revolvimento do produto.

Esta tecnologia é bastante empregada para a secagem de lodos de esgotos, devido a vantagem da utilização da energia solar como fonte de calor para evaporação, permitindo um baixo custo operacional. No Brasil, estão disponíveis trabalhos de secagem natural de lodos de esgotos; dentre esses, podemos citar o trabalho de França *et al.* (2003), que juntamente com a SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, realizaram a secagem de lodos em leitos de secagem em bancada.

### **1.9.3 Secagem solar artificial**

A secagem artificial consiste em submeter o produto úmido, em um secador, sob a ação de uma corrente de ar aquecido. Esta corrente de ar é aquecida por uma fonte de

energia térmica, originária da queima de combustíveis fósseis ou renováveis ou através de resistências elétricas.

Segundo Cavalcante (2003) este tipo de secagem reduz o teor de umidade do material e evita alterações metabólicas, além de minimizar a ação de fungos e insetos. Esta tecnologia possui um custo maior e é amplamente adotada no setor agrícola, não necessita de tanta disponibilidade de mão-de obra como a natural e atende as condições qualitativa e quantitativa de processo e produção.

#### **1.9.4 Secagem solar com uso de estufa - Solar Greenhouse Drynig (SGD).**

Estufa de secagem é um processo de secagem de lodo em plantas solares. Possui o objetivo de acelerar da taxa de evaporação da água através de um efeito estufa artificial e evitar o equilíbrio entre a pressão de vapor e o lodo de ETE através de ventilação interna de ar controlada (Mathioudakis *et al.*, 2013).

Kumar *et al.* (2006) apresentou em seus estudos duas formas de classificação das SGD. A primeira que classifica de acordo com sua estrutura (i) formato de cúpula e (ii) telhado típico. Cada uma destas estruturas possui suas vantagens sendo o secador de estufa tipo cúpula é a máximo aproveitamento da radiação solar global. Já a vantagem do telhado típico é a homogeneização da mistura de ar dentro do secador.

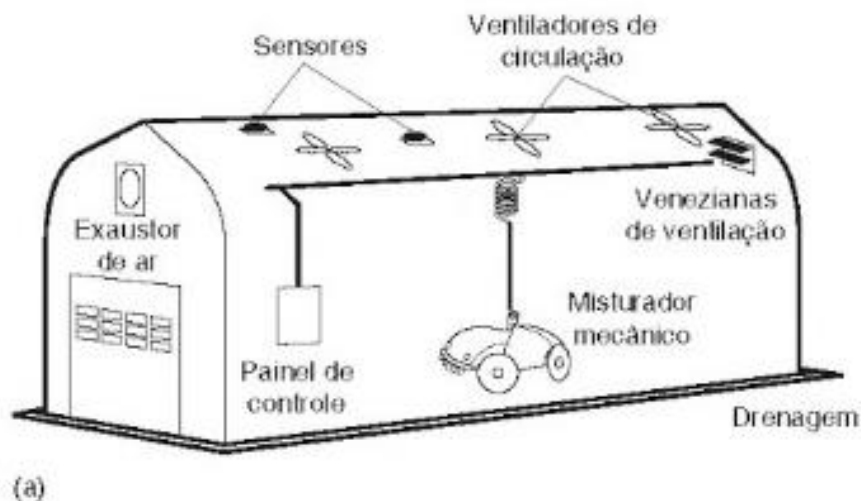
Com base no modo de transferência de calor, o mesmo autor define dois tipos de secadores (i) secador de estufa em modo passivo e (ii) secador de estufa em modo ativo. Baseado na condução desta pesquisa será descrito com detalhes o secador de estufa de modo ativo.

#### **1.9.5 Secador de estufa em modo ativo**

Na maioria dos sistemas de secagem solar os biossólidos pré-desidratados mecanicamente são dispostos em estufa de forma manual ou mecânica. Este sistema é influenciado por dois processos físicos diferentes que são a evaporação e a drenagem, sendo, portanto, afetadas diretamente pelo clima e pela estação do ano. A secagem solar é utilizada em alguns países europeus, não só para a secagem de lodo, mas também de produtos agrícolas e de madeira. Nestes países a temperatura média é significativamente menor e a umidade relativa média é maior que as observadas nas regiões tropicais ou semiáridas.

O sistema de secagem solar ativo desenvolvido pela PARKSON e nomeado de THERMO- SYSTEM Solar Dryer, foi criado para receber lodo líquido, sendo ou desaguado com teor de sólidos próximo de 75%. Este sistema faz uso de uma estufa dotada de uma câmara revestida por material translúcido e de base retangular, com sensores de monitoramento das condições atmosféricas, sistema de medição de condições de secagem com aberturas de ventilação tipo persiana e ventiladores de circulação e exaustores de ar para uso de secagem convectiva e ventilação forçada. Além disso, possui um dispositivo eletromecânico (Electric Mole) para distribuir e revolver o lodo automaticamente (PARKSON, 2016).

Durante o ciclo de secagem, as variáveis climáticas controláveis como: temperatura, umidade e radiação solar são monitoradas por um microprocessador, que também comanda o ciclo operacional do Mole que revolve constantemente o biossólido ali presente. Esta mistura desloca o material mais úmido presente no fundo da camada de lodo, para a superfície, além de injetar ar ao material, o que auxilia na secagem e na redução de odores (PARKSON, 2016). Para auxílio da secagem, há a possibilidade de uso de calor residual de outros processos para aumentar a eficiência do sistema de secagem e diminuir a área da estufa (METCALF e EDDY, 2016) . Ver figura 2 representada abaixo.



**Figura 2 - Esquemática do sistema de aquecimento solar. Fonte: METCALF e EDDY, 2016.**

Ao final do processo, o biossólido se torna um material granular peletizado, biologicamente estabilizado, enquadrado como Classe A (segundo a legislação americana), com teor de sólidos acima de 90% e volume significamente menor ao inicial (PARKSON, 2016). Sendo assim, esta tecnologia proporciona um lodo de boa



qualidade e mais concentrado, facilitando a destinação ambientalmente adequada do mesmo. Ver figuras 3 e 4.



**Figura 3. Estrutura interna do secador solar THERMO-SYSTEM Solar Dryer e a atuação do Eletric Mole. Fonte: PARKSON, 2016**



**Figura 4. Vista externa do secador solar THERMO-SYSTEM Solar Dryer. Fonte: PARKSON, 2016.**

### **1.10 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO: DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO OU BIOMETANIZAÇÃO**

A digestão anaeróbia é um dos processos mais consolidados para estabilização de lodo concentrado oriundo de estações de tratamento de esgotos. Como já descrito anteriormente a biometanização é composta pela decomposição e redução da matéria orgânica na ausência de oxigênio, com o objetivo de produção do biofertilizante e biometano. Ao longo dos anos, houve um aprimoramento de técnicas no dimensionamento e na aplicação desta tecnologia com ênfase na conservação e recuperação de energia para uso benéfico dos biossólidos e dos subprodutos oriundos deste processo (METCALF e EDDY, 2016).

De acordo com Chernicharo (2007), a biometanização é considerado um sistema ecológico balanceado que envolve diversos grupos de microorganismos para converter matéria orgânica complexa (carboidratos, proteínas e lipídios) em metano, gás

carbônico, água, gás sulfídrico e amônia. Acrescido a isso, uma pequena parcela de material orgânico é convertida em biomassa microbiana (5 a 15%).

Dentre os produtos da digestão anaeróbia destacam-se um gás rico em energia chamado de biogás e um efluente. O efluente, que pode ser um material semi-sólido (processo seco) ou líquido (processo úmido), também é denominado digestato. O digestato não deve ser designado composto, a menos que tenha passado por uma compostagem aeróbia no final do processo. (ANGEDALIKI; BATSTONE, 2010).

### 1.10.1 Rota metabólica da biometanização

A conversão da matéria orgânica em biogás e também  $H_2S$  é um processo bioquímico complexo, composto por várias reações sequenciais, cada uma com sua população microbiana específica. A ação em conjunto destes microorganismos conduzem as quatro etapas do processo de biometanização reconhecidas até o momento: hidrólise, acidogênese, metanogênese e sulfetogênese. A figura 5 representa estes processos de forma esquemática.

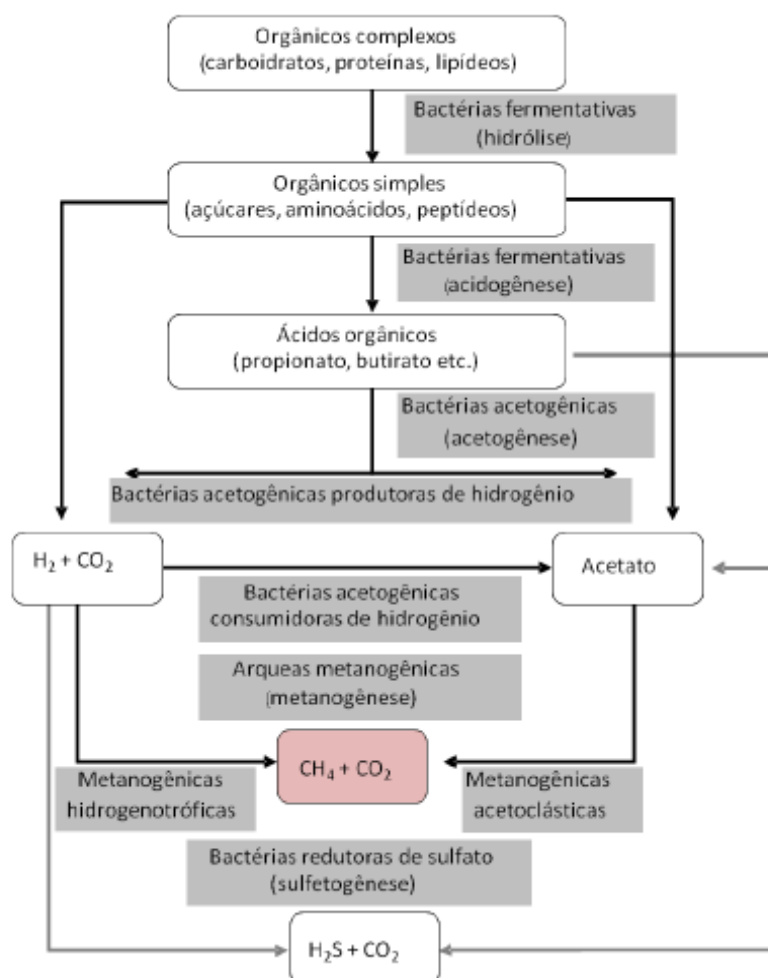


Figura 5: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.  
Fonte: (CHERNICHARO, 2007).

## **Hidrólise**

Primeira e decisiva etapa de desencadeamento do processo de digestão anaeróbia, a hidrólise, consiste na conversão de polímeros particulados complexos (lipídios, proteínas e carboidratos) em monômeros solúveis simples (aminoácidos, ácidos graxo e açúcares) através da ação de enzimas hidrolíticas excretadas pelas bactérias fermentativa hidrolíticas. O resultado desta transformação permite a absorção da matéria orgânica através da parede celular das bactérias fermentativas (CHERNICHARO,2007).

A hidrólise dos polissacarídeos acontece em algumas horas e já a das proteínas e lipídeos ocorrem dentro de alguns dias. Nesse processo, os microorganismos anaeróbios facultativos usam o oxigênio presente no meio, tornando o local adequado a atuação dos anaeróbios obrigatórios (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

## **Acidogênese**

Na segunda etapa, as bactérias acidogênicas incorporam os produtos da primeira etapa no interior das suas células, transformando-os em elementos ainda mais simples, como ácidos orgânicos, álcoois, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio. Por possuírem crescimento acelerado as bactérias acidogênicas são as que mais se beneficiam do processo de biometanização, com exceção aos processos de hidrólise complexos (CHERNICHARO, 2007).

## **Acetogênese**

Nesta terceira etapa os microorganismos responsáveis são as bactérias acetogênicas utilizadoras de hidrogênio, que produzem acetato a partir de hidrogênio e dióxido de carbono e das bactérias acetogênicas produtoras obrigatórias de hidrogênio, que promovem a oxidação dos ácidos graxos voláteis em acetato e hidrogênio. A acetogênese promove a redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO) presente no substrato favorecendo o desenvolvimento de bactérias metanogênicas (CARNEIRO, 2009; IBEWLLI, 2015).

## **Metanogênese**

Nesta última etapa as arqueas metanogênicas, que são estritamente anaeróbias, convertem o acetato e o conjunto  $H_2/CO_2$  em biogás. Devido as diferenças fisiológicas, as arqueas matanogênicas são divididas em dois grupos principais (CHERNICHARO, 2007):

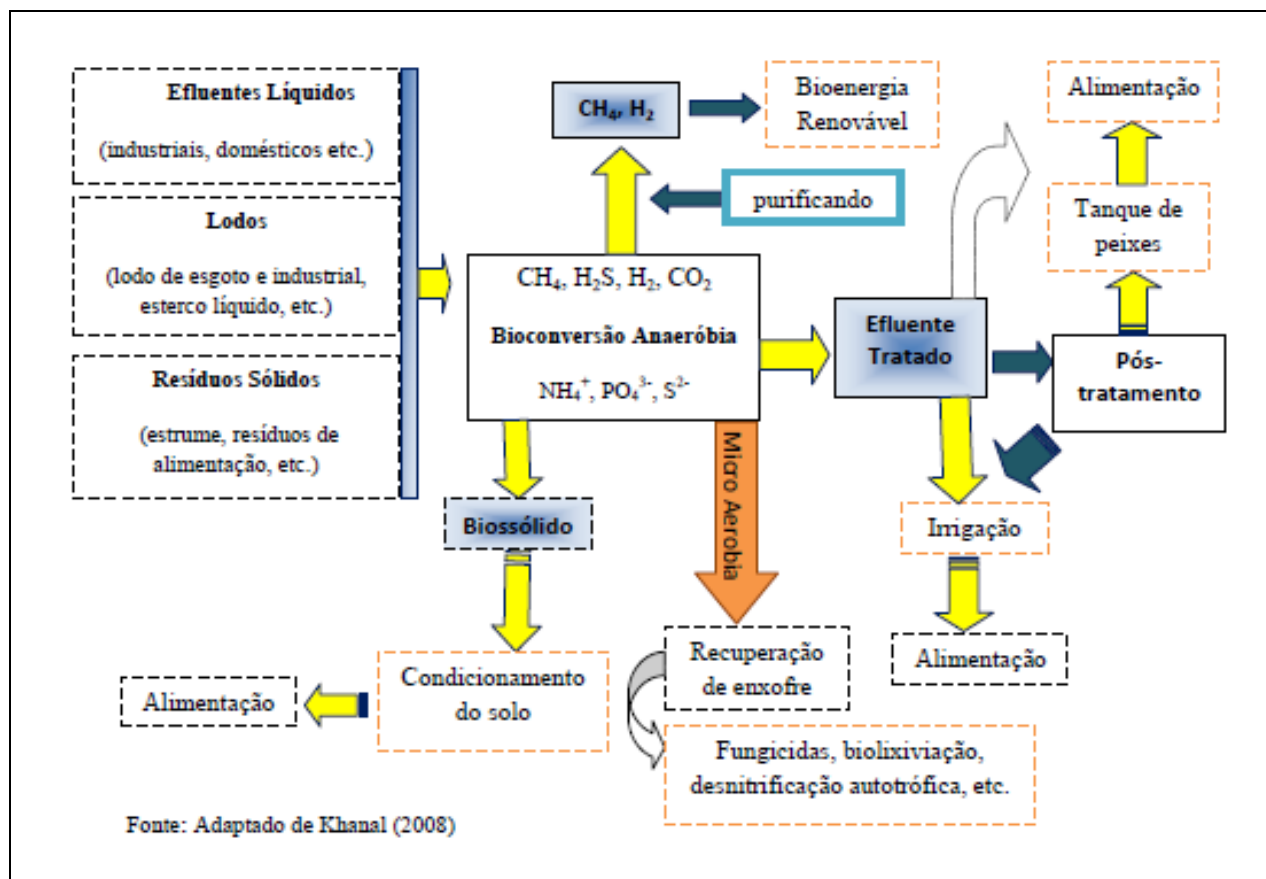
- Arqueas hidrogenotróficas, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano;
- Arqueas acetoclásticas, as quais usam o acetato para gerar o metano e dióxido de carbono.

## **Sulfetogênese**

Fase em que as bactérias sulforedutoras reduzem os compostos sulfurados (sulfato, sulfito) à sulfeto durante a oxidação de compostos orgânicos. Esta etapa somente ocorrerá caso o substrato seja composto por enxofre. A remoção de DQO pode ser feita pela rota sulfetogênica, entretanto resulta na produção de gás sulfídrico, podendo gerar inconvenientes como: problemas de corrosão, mal odor e toxicidade no meio, além disso desvia a rota de produção de metano, prejudicando a possibilidade de aproveitamento energético (CHERNICHARO, 2007).

### **1.10.2 Produtos da Biometanização**

O processo de Biometanização está vinculado ao equilíbrio das etapas descritas anteriormente, que são correlacionadas entre si, através da produção e consumo de substratos. A tecnologia anaeróbia possui diversos potenciais e resulta nos seguintes produtos: biogás (constituído por  $CH_4$  e  $CO_2$ ) e um material digerido semi-estabilizado chamado digestado ou bio sólido. A figura 6 esboça o uso deste processo de bioconversão anaeróbia.



**Figura 6. Processos de bioconversão anaeróbica integrada em recuperação de recursos a partir de resíduos. Fonte: Adaptado de Khanal (2008).**

### Biossólido

Um dos produtos resultantes da biometanização é resíduo semissólido chamado biossólido ou digestado, que é basicamente constituído por matéria orgânica (60%). O digestado e a fração líquida podem ser aplicados em áreas agrícolas ou utilizados em horticultura e paisagismo, caso haja um tratamento prévio visando a reciclagem e potencializando os parâmetros químicos, físicos e biológicos do solo (VILELA, 2015; BRÄNDLI *et al.*, 2007).

A compostagem do digestado antes de aplicá-lo ao solo é procedimento necessário, pois caso o tempo de retenção não seja longo, parte do material do digestado não será completamente digerido podendo provocar contaminação no solo. Caso haja a mistura do biossólido com outros materiais orgânicos, será gerado um composto ainda mais rico em nutrientes, e ao atingir elevadas temperaturas, o mesmo pode ser considerado higienizado (LETTINGA ASSOCIATIONS FOUNDATION, 2009).

## Biogás

O biogás é um subproduto variado oriundo do processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A sua composição é formada pelas gases: metano, dióxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico e outros. Altos teores de oxigênio e nitrogênio podem significar uma possível contaminação do reator com o ambiente externo (VILELA, 2015). A tabela 3 descreve a porcentagem de cada gás que compõe o biogás.

**Tabela 3. – Composição do biogás em porcentagem, distribuído de acordo com seus constituintes.**

Gás	Símbolo	% no Biogás
Metano	CH <sub>4</sub>	50 - 80 % vol.
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	20 - 40 % vol.
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 - 3 % vol.
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,5 - 3 % vol.
Sulfeto de hidrogênio e outros	H <sub>2</sub> S, CO, NH <sub>3</sub> , O <sub>2</sub>	1 - 5 % vol.
Vapor d'água	H <sub>2</sub> O	Saturado

FONTE: La Farge, 1979 apud Sampaio, 2015. Adaptado.

As características do biogás dependem da pressão, da temperatura e da umidade, bem como da concentração de metano e de gases inertes e/ou ácidos. Dependendo da aplicação, o biogás pode ser usado nas condições em que é gerado, mas em sua maioria é necessário a redução da concentração de gás sulfídrico e de dióxido de carbono, e também a redução da umidade e/ou a elevação da pressão (MACHADO, 2011).

O poder calorífico de um gás é definido como sendo a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de volume do gás. Ao levar em conta somente o conteúdo energético, o biogás purificado corresponde ao GNC (Gás Natural Combustível), e seu poder calorífico é maior quanto menor for a concentração de contaminantes na mistura que o compõe (COSTA, 2006).

Na tabela 4, encontram-se relacionados alguns gases com os seus respectivos poderes caloríficos.

**Tabela 4. Relação de gases e seus respectivos poderes caloríficos.**

<b>Tipo de Gás</b>	<b>Poder calorífico (kJ/m<sup>3</sup>)</b>
Propano comercial	45.800
Butano comercial	44.600
Gás natural	37.300
Metano	35.800
Gás da digestão	22.400 (admitindo 65% de metano gerado no digestor)

Fonte: Machado (2011).

Ao comparar o biogás aos gases comerciais, ele possui um poder calorífico muito inferior aos demais, apesar disso, seu uso é vantajoso, pois, o mesmo é oriundo de fontes renováveis e resultado da destinação correta de resíduos que normalmente causariam grandes problemas ambientais e sociais.

### **1.10.3 Fatores que interferem no processo**

O processo de digestão anaeróbia é condicionado a diversos fatores, como: teor de sólidos, temperatura, pH, nutrientes, toxicidade. A seguir será discutido estes tópicos.

#### **Teor de sólidos**

De acordo com Vilela (2015), a concentração de sólidos é tratada como a definição da massa total a ser digerida, seja ela de origem orgânica ou inorgânica. Já a definição de sólidos voláteis (SV) em resíduos sólidos, é o resultado da subtração dos sólidos totais pelas cinzas oriundas de combustão completa, sendo subdivididos em sólidos voláteis biodegradáveis (SVB) e sólidos voláteis refratários (SVR).

Segundo Verma (2002), os resíduos com alto teor de SV e baixo teor de SVR, são favoráveis a biometanização, sendo a composição do substrato característica fundamental para o rendimento positivo na qualidade do biogás e de seu digestado.

#### **Temperatura**

Os microorganismos, principais responsáveis pela decomposição anaeróbia, exigem diferentes temperaturas para crescer e se desenvolver. Isso ocorre pois a temperatura afeta as reações enzimáticas, podendo desnaturar enzimas e proteínas e até mesmo destruir os processos metabólicos dos microorganismos na produção enzimática (VILELA, 2015)

Segundo pesquisas, as bactérias produtoras de biogás principalmente as que geram o metano, demonstram uma hipersensibilidade às alterações buscas de temperatura. Sendo a melhor faixa de produção de biogás entre 35 a 45°C, para bactérias mesofílicas, ocorrendo produção também na faixa termofílica de 50 a 60°C (VILELA, 2015 apud CASSINI, 2003).

## **pH**

Este parâmetro é um dos mais importantes do processo de decomposição anaeróbia, e deve-se controlar rigorosamente, ele aponta o equilíbrio do sistema e a estabilidade do digestor.

Dentro os grupos de microorganismos envolvidos, os da fase matenogênica são os mais sensíveis a este parâmetro, podendo ocorrer até a paralisação de seu crescimento devido a índices baixos de pH. Normalmente estes seres aceintam faixas de 6,5 a 7,6, e caso ocorra algumas instabilidades no sistema, pode promover o acúmulo de ácidos graxos voláteis, provocando um desbalanciamento que afeta a produção de metano (BIDONE; POVINELLI, 1999).

Alterações repentinas de pH no interior do digestor prejudica as atividades das bactérias metanogênicas, as atividades enzimáticas e as concentrações de toxidades dos compostos ali existentes. Já em relação a alcalinidade, o pH não poderá ultrapassar valores acima de 8,0, pois caso isto ocorra, irá favorecer a formação de amônia que pode ser tóxica em grandes concentrações. Neste contexto a alcalinidade dever ser suficiente para manter o pH na faixa de 6,6 a 7,6 (BORGES, 2003; METCALF e EDDY, 2016).

## **Nutrientes**

O crescimento e proliferação dos microorganismos no interior do biodigestor depende não somente da matéria orgânica a ser decomposta, mas também de nutrientes inorgânicos. Estes elementos são denominados macro e micronutrientes, sendo os mais importantes para o processo o nitrogênio, enxofre, cálcio, fósforo, magnésio e os elementos traço, como cobalto, níquel, ferro e manganês. Sabe-se que a concentração elevada de alguns nutrientes pode causar inibição da atividade microbiana, para evitar este evento, é necessária análise prévia da amostra (LETTINGA ASSOCIATES FOUNDATION, 2009).



## **Toxidade**

Segundo Chernicharo (2007), a concentração e a particularidade dos elementos presentes na amostra a ser digerida é que leva a toxidade de compostos orgânicos e inorgânicos. Sendo assim, grandes concentrações de compostos tóxicos podem inibir a taxa de atividade microbiana a níveis baixíssimos.

A amônia é um elemento que pode ter efeitos benéficos (fonte de nitrogênio e atuação de tampão na mudança de pH) ou adversos, variando de acordo com sua concentração. Para que ocorra toxidade, é necessário que haja um desequilíbrio no sistema, como a inesperada elevação de íons  $H^+$  (pH igual a inferior a 7,2). Esta mudança busca deslocar o equilíbrio, produzindo ora amônia –  $NH_4$ , ora sua forma não ionizada –  $NH_3$ . Sendo esta última, responsável pela inibição da biometanização da matéria orgânica para concentrações menores do que a forma da amônia, prejudicando todo o conjunto (CHERNICHARO, 2007).

A presença de compostos contendo enxofre e proteína, podem levar a toxidade do meio. Para isso, é necessário a produção de sulfeto (através da redução do sulfato) que ocorre devido a diminuição do pH do meio. Geralmente, a redução do sulfato em reatores anaeróbios pode causar paralisação da metanogênese, já que, com as grandes concentrações de sulfato os microorganismos sulforetutores oxidam a matéria orgânica, que deixa de ser transformada em metano, gerando elevada quantidade de gás sulfídrico. Com isso, o sistema se torna tóxico para as bactérias metanogênicas, corrosivo e com odor desagradável (REIS, 2012).

### **1.10.4 Biogás: Estimativa, purificação, produção e aproveitamento energético**

Como já foi dito anteriormente, o biogás é composto por diversas substâncias que atrapalham o seu aproveitamento energético e diminuem o poder de combustão. Assim, a presença de substâncias - como água, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) - interfere no processo de queima do biogás, pois elas entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. A combustão incompleta também pode ser motivada na presença do ácido sulfídrico, que provoca perda de potência e corrosão precoce prejudicando o rendimento e a vida útil do motor térmico.

Existem diferentes alternativas de purificação aplicáveis ao biogás, devendo ser definida a mais adequada para a aplicação energética que se pretende. Por exemplo:

para a aplicação em abastecimento de veículos, é necessária a remoção dos traços de enxofre, que geram complicações nos motores; e do CO<sub>2</sub>, purificações que são necessárias para o melhor desempenho do motor no ramo automotivo (MACHADO, 2011).

### **Estimativa de geração de biogás**

Conforme afirma Bielschowsky (2015) apud Chernicharo (2007), a geração do metano pode ser calculada por duas formas: determinação da composição química do líquido tratado ou por meio da DQO consumida durante o processo de digestão anaeróbia. A primeira técnica, determina-se a composição química do afluente que entra no reator e faz uso da equação estequiométrica de Buswell. Neste cálculo, não se considera o substrato de produção de biomassa bacteriana ou outras rotas de conversão da matéria orgânica, o que leva a um resultado ótimo na produção de metano estequiometricamente possível. A segunda maneira considera-se que se consome um mol de metano para cada dois moles de oxigênio em completa oxidação para gás carbônico e água.

Vale ressaltar que os dois métodos descritos avaliam a produção teórica somente do metano. Segundo a perspectiva dos estudiosos Metcalf e Eddy (2003), rotineiramente, a geração total de biogás pode ser estimada ao considerar a porcentagem de sólidos voláteis consumidos no reator anaeróbio, de 0,75 a 1,12 m<sup>3</sup>/kg de SSV destruído. Há também, o uso de aproximações grosseiras, que estimam uma geração per capita, de 15 a 22 litros por pessoa para lodo primário e em torno de 28 litros por pessoa para estações com tratamento secundário.

### **Tecnologias de produção de Biogás**

As tecnologias utilizadas para a biometanização são definidas de acordo com o substrato alimentador. A umidade do substrato e sua viscosidade são importantes para definição da técnica de digestão, podendo ser úmida ou seca. A diferença entre elas é o fato da digestão úmida ser bombeável e a seca ser empalhável. Apesar de não haver uma definição oficial relacionado ao percentual de umidade, na prática a linha divisória entre a digestão seca e a úmida gira em torno de 30% de matéria seca no substrato (PORTAL DO BIOGÁS, 2015).

É importante fazer a análise do substrato, pois ajuda na definição do funcionamento alimentar do fermentador, que pode ser de forma contínua, semi-contínua ou descontínua. Assim, as informações de composições químicas e a velocidade de decomposição da matéria orgânica servem de parâmetro para previsão do tempo de duração das fases de digestão do substrato (PORTAL DO BIOGÁS, 2015).

As quatro fases (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metagênese) podem acontecer de modo paralelo em um único fermentador, ou serem distribuídas em dois ou mais fermentadores. Outro fator importante para a escolha do tipo de tecnologia do biodigestor é a temperatura; segundo este parâmetro, os processos são classificados como psicofílicos, mesofílicos e termofílicos. Depois de definir a temperatura do processo é aconselhável mantê-la constante, pois os microrganismos atuantes são muito sensíveis a mudanças de temperatura (PORTAL DO BIOGÁS, 2015).

A produção de biogás oriundo de lodo de ETE também requer algumas especificações. Para a estabilização de lodos primários e secundários oriundos de tratamento de esgotos usam-se digestores anaeróbios convencionais. Esses digestores possuem, em sua maioria, formato circular, construído com concreto armado, detentores de tampa fixa ou móvel, e com diâmetros variando de 6 a 38 metros e profundidade entre 7 e 14 metros. Para facilitar a sedimentação e a retirada dos sólidos concentrados, as paredes internas geralmente possuem uma inclinação vertical/ horizontal de 1 para 4 (PROSAB, 2003) .

Os digestores anaeróbios convencionais são preparados para estabilização de resíduos com elevada concentração de sólidos. Considerando que a fase da hidrólise pode ser comprometida para resíduos com esse perfil, é necessário uma otimização do sistema, sendo comum o aquecimento do digestor, para mantê-lo em uma faixa de temperatura de 25° a 35°C (PROSAB, 2003).

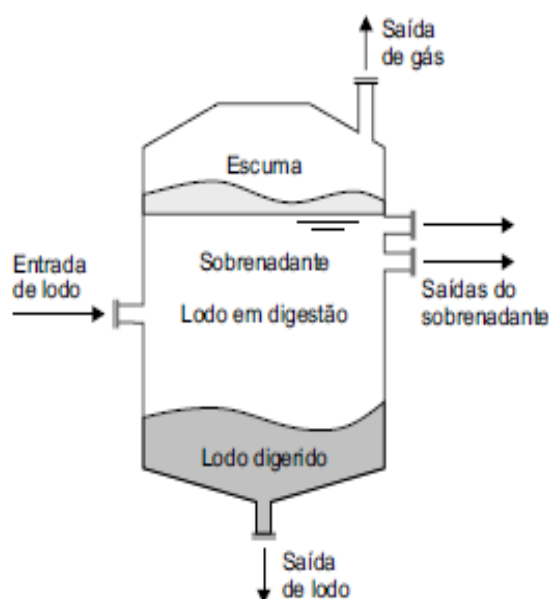
A definição do tipo de digestor que se encaixa para determinada estabilização de lodo de ETE, considera-se a presença de dispositivo misturador e o número de estágios para o tratamento. Existem atualmente três tipos de dispositivos que serão detalhados a seguir: digestor anaeróbio de baixa taxa, digestor anaeróbio de um estágio e alta taxa e o digestor de dois estágios e alta carga.

### ***Digestor anaeróbio de baixa carga***

Este tipo de digestor não dispõe de dispositivos de mistura e digere o lodo em estágio único. As fases de acidogênese e metanogênese ocorrem simultaneamente, proporcionando a digestão, o adensamento e a formação de sobrenadante do lodo. (VERMA, 2002 apud VILELA, 2015).

Ao longo da operação, o lodo bruto é adicionado no mesmo local que lodo que está sendo digerido e o biogás sendo gerado. Com o movimento ascendente do biogás aliado a falta de agitação, arrastam as partículas de lodo e outros materiais flutuantes para a superfície, formando uma camada de espuma e de líquido sobrenadante. O lodo mineralizado e mais denso acumula-se na zona de lodo estabilizado, de onde é removido para a etapa de desaguamento (CHERNICHARO, 2007).

Neste contexto, configuram-se quatro zonas distintas dentro do reator: zona de espuma; zona de sobrenadante; zona de digestão de sólidos; zona de lodo estabilizado. A figura 7, mostra esquematicamente um digestor anaeróbio de lodo do tipo taxa convencional.



**Figura 7. Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de baixa taxa. Fonte: Chernicharo (2007).**

A ausência de mistura e estratificação do lodo não permitem uma digestão completa, chegando a ter até 50% do volume total de lodo não processado no digestor, implicando a necessidade de reatores de grandes volumes para alcançar uma eficiência

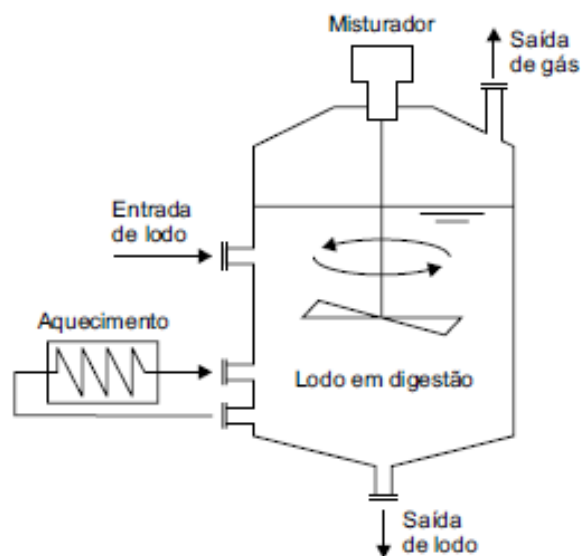
satisfatória. Diante destas limitações, os digestores de baixa carga são utilizados principalmente em pequenas estações de tratamento (PROSAB, 2003).

### ***Digestor anaeróbio de um estágio e alta carga***

O digestor de estágio único e alta carga incorpora mecanismos de aquecimento e mistura e é operado com taxas de alimentação uniforme e com lodo bruto pré-adensado. Estas características garantem condições de uniformidade em todo o digestor. Com isso, o volume do tanque pode ser reduzido e a estabilidade do processo é melhorada (CHERNICHARO, 2007).

Devido ao sistema de mistura, não há formação de zonas distintas. A alimentação e a descarga são normalmente contínuas e de mesma intensidade, com uma remoção de sólidos voláteis na ordem de 45% a 50% (NUVOLARI, 2011).

A figura 8 mostra um digestor anaeróbio de alta carga e simples estágio típico.



**Figura 8 - Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de um estágio e alta carga.**

**Fonte: Chernicharo (2007).**

Segundo a PROSAB (2003), para se conseguir a mistura do lodo no interior do digestor podem ser utilizadas diferentes técnicas, como recirculação de gás, recirculação de lodo ou misturadores mecânicos de diversas configurações. A alimentação do digestor deve ser feita com a adição de pequenas quantidades de lodo de forma

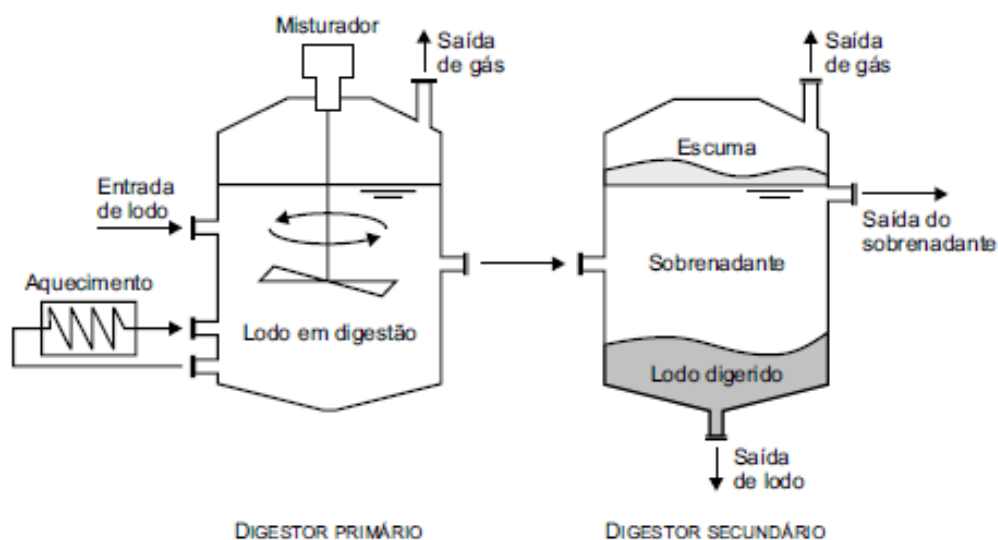
contínua, em tempos de ciclo de 30 minutos até 2 horas, proporcionando uma manutenção periódica no reator.

### ***Digestor anaeróbio de dois estágios e alta carga***

O digestor de dois estágios consiste basicamente na incorporação de um segundo tanque de digestão, operando em série com um digestor primário de alta carga. No primeiro tanque operam os sistemas de mistura e de aquecimento com controle de temperatura, este digestor ocorre a digestão do lodo propriamente dita. O segundo tanque é usado para estocar o lodo digerido e separar os sólidos digeridos do líquido sobrenadante – que possui características de clarificação (NUVOLARI, 2011).

Existem situações em que os dois tanques são projetados de forma idêntica, de tal forma que qualquer um dos dois pode ser utilizado como digestor primário. Em outras situações, o digestor secundário pode ser um tanque aberto, um tanque sem aquecimento, ou até mesmo uma lagoa de lodo (PROSAB, 2003).

A figura 9 ilustra o digestor anaeróbio de duplo estágio.



**Figura 9: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de dois estágios e de alta carga.**

*Fonte: Chernicharo (2007).*

### **Métodos de aproveitamento energético do biogás**

No processo de recuperação e aproveitamento do biogás em ETE's, é frequente a prática de dois cenários: A combustão direta com geração e uso de calor, conversão do

biogás em eletricidade e acrescido a estas duas situações há o emprego da cogeração destas duas formas de energia: elétrica e térmica (ROSA, 2012). As principais alternativas para aproveitamento do biogás e sua classificação de acordo com (LOBATO, 2011), ver tabela 5.

**Tabela 5 - Descrição das principais alternativas para gerenciamento do biogás**

Alternativa	Tipos/classificação	Descrição
Combustão direta, sem recuperação de energia	Queimadores abertos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constituição básica de um queimador acoplado a um defletor de vento para proteger a chama. O controle de gás é rudimentar, não existe isolamento térmico, a mistura é pobre, o que resulta na combustão incompleta do biogás e perda de calor na queima.</li> </ul>
	Queimadores fechados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São instalações permanentes, não podendo ser transportadas para outro local.</li> <li>• A combustão ocorre sob condições controladas, garantindo a destruição quase completa do biogás. Os níveis de fumaça, chama e ruído são praticamente imperceptíveis.</li> </ul>
Combustão direta, com recuperação de calor	Caldeiras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferência de energia de um combustível para a água ou outro fluido contido no interior de uma câmara fechada, e daí até o ponto de utilização final.</li> </ul>
	Secadores térmicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processo de remoção umidade. O biogás quando queimado pode ser fonte de energia térmica para o aquecimento de materiais como o lodo, permitindo a secagem térmica.</li> </ul>
Geração combinada ou simples de eletricidade e calor	Motores de combustão interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nos motores de combustão interna (MCI), a queima de combustível e ar no interior da câmara de combustão gera uma reação exotérmica, com a formação de gases à elevada temperatura e pressão.</li> </ul>
	Turbinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipamento de fluxo contínuo que desenvolve chama estável durante a combustão. Este mecanismo permite a utilização de vários combustíveis e também proporciona uma combustão mais limpa.</li> </ul>
	Micro-turbinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os gases aquecidos em alta pressão são expandidos através das pás de uma turbina, fazendo com que esta gire em alta velocidade. O processo é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico.</li> </ul>

Fonte: (LOBATO,2011)

Com o avanço nos estudos de aproveitamento energético, novas tecnologias podem ser cogitadas. O maior destaque está nas que objetivam a conversão do biogás em biometano e em hidrogênio, sendo estes dois combustíveis detentores de diversas possibilidades de uso, sendo em muitos casos, com eficiências de conversão energética superiores aos métodos tradicionais.

As formas de aproveitamento do biogás vão depender das características desse combustível. Dependendo das faixas de concentração das substâncias que o compõe, este pode ser utilizado para diferentes fins. As tecnologias mais avançadas de conversão de biogás em biometano e hidrogênio não fazem parte do escopo deste estudo e por isso não são abordadas.

### ***Combustão direta do biogás para aproveitamento térmico***

A utilização do biogás para a produção de calor é uma das alternativas utilizadas em ETEs através da queima em sistemas de aquecimento ou em caldeiras. Os usos mais comuns são: para secagem do lodo em secadores térmicos; como combustível complementar em incineradores de lodo e para aquecimento dos digestores de lodo - como uma medida para aumentar a produção de biogás (ROSA, 2012).

Acrescido a isso, conforme citado por Jordão (2011), uma boa alternativa de utilização do biogás é o seu aproveitamento como fonte de energia para os secadores térmicos. Nessa situação, após a queima do biogás, há a geração de gases quentes que, se direcionados em estufas com depósito de lodo (secadores térmicos diretos) ou através da transmissão do calor mediante condução em uma parede metálica (secadores térmicos indiretos), promovem a evaporação da água contida no lodo diminuindo sua umidade.

A combustão direta usada na secagem térmica do lodo, é considerada a uma alternativa que visa diminuição do peso e volume deste resíduo, levando a diminuição dos custos de transporte e disposição final. Este processo elimina os microorganismos patogênicos e preserva a matéria orgânica presente no lodo, promovendo assim, a melhor qualidade do lodo seco que pode ser utilizado na agricultura (ANDREOLI, VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Outra medida adotada, que une os secadores térmicos e a secagem solar do lodo, é uso do biogás para aquecer o piso da estufa, ampliando a taxa de aplicação de lodo e aumentando a capacidade de secagem. No Brasil, devido às elevadas temperaturas, essa é uma alternativa a ser considerada (VALENTE, 2015).

Ainda de acordo com Jordão (2011), nos países de clima frio, os gases coletados dos digestores anaeróbios são usados para alimentar caldeiras. Essas funcionam transferindo a energia do combustível para a água ou outro fluido contido no interior de uma câmara fechada. Tal fluido, já aquecido ou vaporizado, é utilizado como fonte de calor de vários processos (LOBATO, 2011).

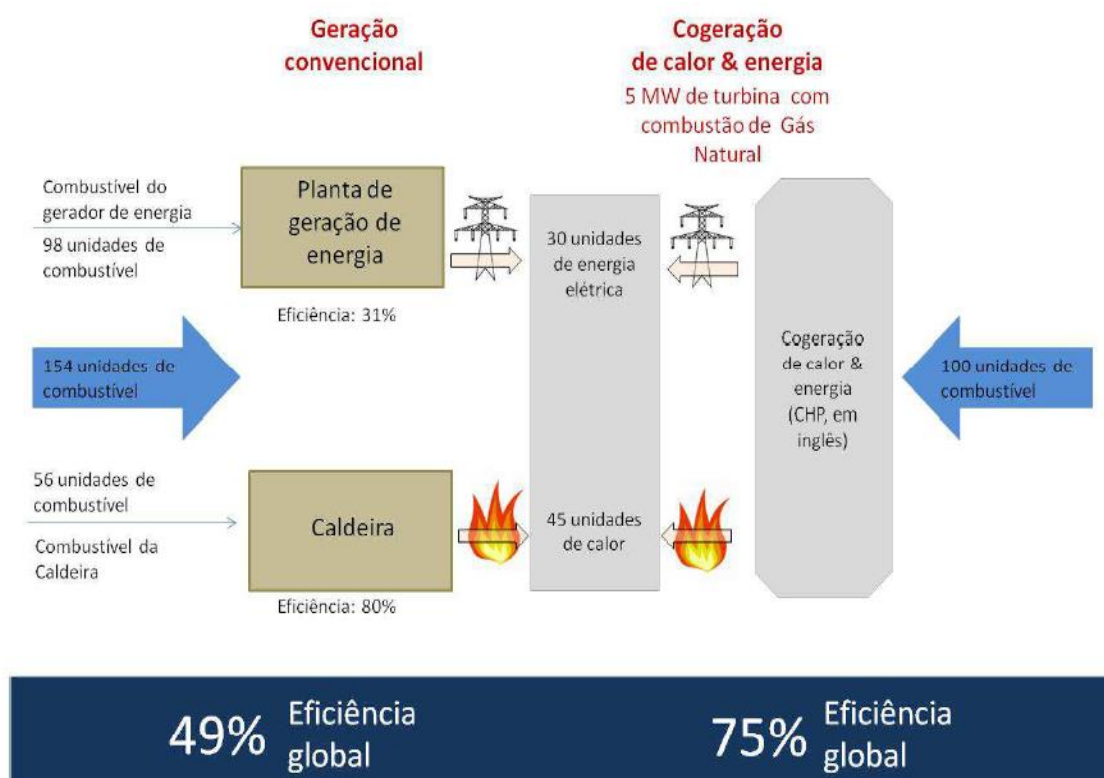
Dessa forma, segundo Lobato (2011), a combustão direta para geração de calor é o método mais simples e eficiente de recuperação energética do biogás, uma vez que 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil.



### *Geração de eletricidade a partir do biogás*

As tecnologias de geração e cogeração de energia - geração simultânea de duas ou mais formas de energia útil a partir de uma única fonte, (SZKLO e TOLMASQUIM, 2001) possuem alta demanda e comprovação de resultados satisfatórios em diversos sistemas, abrangendo os diferentes tipos de combustíveis e diversas potências.

Em ETE's é comum o uso do biogás como combustível para gerar eletricidade através da cogeração, esta tecnologia converte a energia química contida nas moléculas do biogás em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Desta forma, o processo combinado de geração de energia elétrica e térmica é mais eficiente do que os processos unitários (VALENTE, 2015). A figura 10 exemplifica o que foi descrito com a comparação de dois sistemas de geração de energia e calor.



**Figura 10: Exemplo da Eficiência da Cogeração de Energia Elétrica e Calor. Fonte: (Adaptado de EPA, 2011).**

A EPA (2011) destaca as principais vantagens do uso de cogeração: 1) a produção de energia a um custo inferior a eletricidade de varejo; 2) a substituição de combustíveis externos para necessidades térmicas; 3) uso energético oriundo de fonte de combustível renovável e qualificar a ETE em programas de energia verde de serviços

públicos; 4) a melhora na confiabilidade da energia; 5) redução das emissões gasosas que contribuem para o efeito estufa dentre outros poluentes do ar.

Os equipamentos de conversão em energia elétrica através da cogeração mais usuais e em operação no mercado são motores de combustão interna do tipo “Ciclo-Otto”, as turbinas e microturbinas. Algumas tecnologias em desenvolvimento também são encontradas, como por exemplo o motor stirling (JORDÃO, 2011).

- ***Motores a gás em ciclo Otto***

Os Motores de Combustão Interna são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível líquido ou gasoso em energia mecânica através do acionamento de pistões confinados em cilindros. Os motores com ciclo Otto permite o uso de combustíveis alternativos, como o biogás.

Uma das principais vantagens da utilização destes motores é que eles não requerem um biogás de alta qualidade, quando comparado às outras tecnologias de geração de energia e pode ter uma eficiência de geração de energia entre 29% e 40%. Esta tecnologia libera ar quente durante o seu funcionamento que pode ser aproveitado como fonte de energia térmica (BIELSCHOWSKY, 2014; WERF 2011).

Para o uso do biogás em motores de combustão interna de ciclo “Otto” deve-se preencher alguns requisitos: a temperatura máxima do biogás não deve exceder 40 °C para não prejudicar a vida útil das membranas da linha de controle e regulagem de gás e não afetar a temperatura da mistura de ar e gás e, conseqüentemente, o desempenho do motor; o poder calorífico inferior deve estar situado entre 4,5 kWh/m<sup>3</sup> e 7 kWh/m<sup>3</sup> (45% a 70% de CH<sub>4</sub>, o restante de CO<sub>2</sub>), sendo possível compensar oscilações do poder calorífico inferior de ±1%/30 s (conforme o fabricante) por sistemas de regulação; a umidade relativa do biogás não deve ultrapassar 80% para garantir uma distância segura ao ponto de orvalho (DWA, 2011).

Essa diferença do ponto de orvalho deve ser respeitada especialmente na linha de controle e regulagem de gás para evitar condensação. A remoção do condensado deve ser suficiente para que não penetre em partes críticas do sistema, tais como a linha de controle e regulagem de gás e o compressor (DWA, 2011).

Para aplicação desta tecnologia com uso de biogás, deve-se observar as restrições de uso indicadas pelos fabricantes de motores. Este procedimento deve ser considerado ainda na fase de planejamento, já que, a banalização dessas informações

podem levar a impactos significativos sobre os custos operacionais e de investimentos. Assim, conforme a prescrição, o tratamento do gás e/ou aumento da pressão, por exemplo, podem ser estritamente obrigatórios ou inteiramente dispensáveis.

- ***Turbinas e Microturbinas***

As turbinas a gás podem ser divididas em turbinas e microturbinas. Elas foram desenvolvidas para uso no transporte, como ônibus e aviões. Como esta tecnologia possui baixa restrição ao teor de metano no combustível, de 25% a 35%, iniciou-se a aplicação para a geração de energia elétrica a partir do biogás (BIELSCHOWSKY, 2014).

As principais vantagens do uso das turbinas com relação às microturbinas são o baixo custo de manutenção e de ruído se comparado com o de outras tecnologias que utilizam o biogás, enquanto que a desvantagem seria o fato de que é uma tecnologia em desenvolvimento, que ainda não obteve sua maturidade (BRUNO *et al*, 2009).

Segundo este mesmo autor, as microturbinas apresentam um funcionamento similar às turbinas, mas a maioria delas possui um regenerador interno que recupera parte do calor de exaustão da turbina para pré-aquecer o ar comprimido. O gás ao sair do regenerador pode ainda ser utilizado em outros sistemas que necessitem de gases com altas temperaturas como boilers, aquecimento de áreas de convívio. (BRUNO *et al*, 2009)

O funcionamento destas tecnologias se baseia no processo termodinâmico do ciclo de Brayton, sendo constituídas por compressor, câmara de combustão e a turbina de expansão. O ar comprimido é injetado na câmara de combustão fornecendo o oxigênio para a queima do combustível. A mistura aquecida e em alta pressão é expandida pela turbina fazendo com que suas pás girem em alta velocidade elevando sua temperatura. O gás resultante é expandido na turbina, movendo-a gerando eletricidade. Para realizar a recuperação da energia calorífica do gás na saída, muitas microturbinas são dotadas de regeneradores que recuperam parte da energia para pré-aquecer o gás que entrará na combustão, reduzindo assim o consumo de combustível (EPA, 2008; BRUNO *et al*, 2009).

- ***Motores Stirling***

Nos motores Stirling, a geração de energia mecânica ocorre semelhante aos motores à combustão interna, através da movimentação de um pistão. Neste motores, a queima do biogás ocorre em uma câmara externa ao motor, sendo esta uma das vantagens do uso desse motor em relação ao de combustão interna pois, o biogás não entra em contato direto com as partes internas do motor, diminuindo os problemas de danificação de equipamento causados por gases poluentes, como o H<sub>2</sub>S. Esta é uma tecnologia emergente, assim, poucos dados são conhecidos do seu funcionamento em longo prazo (BIELSCHOWSKY, 2014).

Esta tecnologia, libera gases quentes durante seu funcionamento, podendo ser utilizado como unidade cogeração de energia e calor. Segundo Pöschl e outros (2010) as eficiências elétricas e térmicas para unidades superiores a 100 KWel são de 24% e 72% respectivamente.

#### ***Uso do biogás em substituição ao Gás Natural***

Para fazer uso do biogás em substituição ao gás natural, é necessário purificá-lo através de diversas etapas para haja a retirada de poluentes de forma eficiente. Este fato, contribui para o baixo investimento nesta tecnologia, pois eleva os custo de tratamento, já que, há a necessidade de vários procedimentos para alcançar níveis altos de pureza (WERF, 2011).

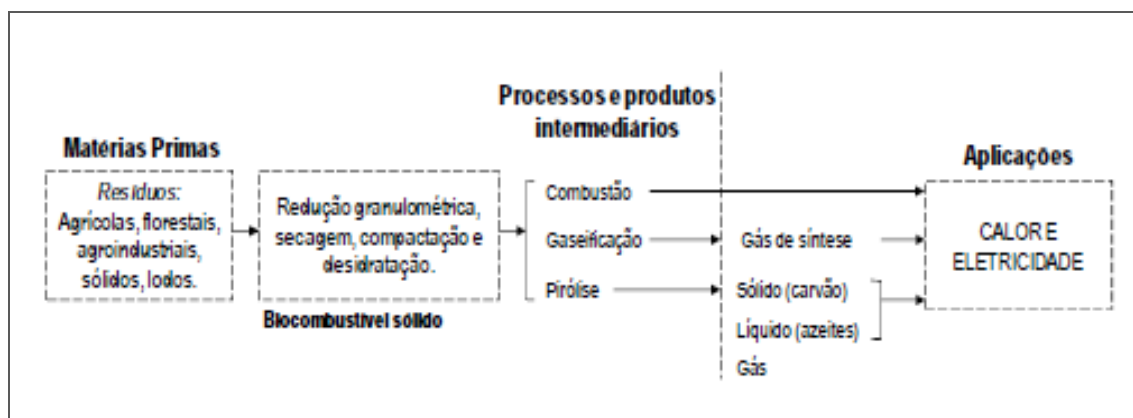
Apesar disso, o aproveitamento do biogás como combustível para veículos automotores sofreu um impulso na segunda metade dos anos de 1970 devido ao aumento do preço de venda dos combustíveis líquidos (JORDÃO, 2011).

### **1.11 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO: CONVERSÃO TERMAL**

Estudos indicam diversas técnicas de tratamento do lodo de ETE e dentre elas destacam-se os processos térmicos. Esta tecnologia promove a destruição química dos polímeros a elevadas temperaturas, sob condições controladas de temperatura, pressão, teor de oxigênio, tempo de reação, dentre outros fatores. Acrescido a isto, ela reduz substancialmente o volume/massa de resíduos finais, previne os odores e elimina a biodegradabilidade e potencial de formação de metano e chorume (ROSA, 2012).

O tratamento térmico do lodo segundo Judex *et al.* (2012), é vantajoso pois: (i) diminui os riscos inerentes ao manuseamento do resíduo, (ii) possui energia disponível elevada ( $7-12 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , base seca) passível de ser aproveitada no local, diminuindo os custos de transporte para fora dos limites da ETE e a dependência de fontes externas. Para verificar o potencial de uso do lodo de ETEs como combustível em processos térmicos o mesmo deve estar desidratado e seco e deve haver o conhecimento da sua composição físico-química e biológica. Além disso, o poder calorífico do lodo é um parâmetro de suma importância, sendo o poder calorífico superior (PCS) para lodos bruto de ETEs na ordem de  $17 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , para lodo ativado  $15 \text{ MJ.kg}^{-1}$  e  $11 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para lodo digerido por processos aeróbios, anaeróbios ou pelo uso de cal (WERLE e WILK, 2010).

Os processos térmicos mais comuns são a pirólise, gaseificação e combustão/incineração. Estes processos decompõem os componentes orgânicos do lodo a altas temperaturas. Na combustão há a oxidação total e a liberação da energia na forma de calor. Já nos processos de gaseificação e pirólise, há a formação de calor acrescido a geração de biocombustíveis intermediários no estado sólido, líquido e gasoso. A figura 11 apresenta um fluxograma com os principais processos e formas de conversão de energia.



**Figura 11. Ilustração dos processos e tecnologias de conversão termal. Fonte: (ROSA, 2013)**

Como o objetivo da pesquisa visa o aproveitamento energético do lodo, a combustão é a tecnologia mais indicada para este trabalho pois ela, possui como principal finalidade a obtenção de energia pela queima, sem necessidades especiais de prevenção e/ou controle dos poluentes não convencionais (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

## Combustão

O processo de combustão é considerado um dos processos térmicos mais antigos e mais utilizados pelo homem. É caracterizado por reações exotérmicas entre combustível e agentes oxidantes que liberam calor. Em uma combustão ideal, todo carbono é oxidado para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), todo o hidrogênio para água (H<sub>2</sub>O) e todo o enxofre para dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

A eficiência da combustão está diretamente ligada ao teor de carbono fixo e hidrogênio no material, além de seu poder calorífico superior. Em contra partida, altas concentrações de nitrogênio e enxofre podem gerar a liberação de subprodutos como NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>, de gases corrosivos, como o CO os COV (compostos orgânicos voláteis), e de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares. Caso haja a elevada concentração de cloro, há a possibilidade de formação de HCl, dioxinas e furanos e outras espécies de organoclorados (BORGES, 2008).

De acordo com Conesa *et al.* (2009), a geração de alguns compostos decresce com o aumento da taxa de oxigênio no processo térmico, principalmente hidrocarbonetos voláteis (metano, etano e benzeno), os quais são consumidos na presença do oxigênio. Já os compostos oxidados (álcool, ácidos orgânicos e furanos) e compostos intermediários (óxidos de carbono e hidrocarbonetos voláteis) atingem a sua máxima formação diante de elevada quantidade de oxigênio.

O lodo de esgoto, como a maioria dos rejeitos orgânicos, é rico em material volátil e passível de ser convertido em fonte de energia utilizável. A recuperação de energia através da combustão do lodo de esgoto está sendo usada em diversos países e tem como objetivo garantir a autossuficiência energética no processo de conversão (SANCHEZ *et al.*, 2009).

No processo de combustão do lodo, a água é completamente evaporada e o material orgânico é oxidado em altas temperaturas à CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, como apresentado nas equações 1-1 (evaporação) e 1-2 (oxidação e combustão).



O calor liberado nesta reação produz vapor de água que é encaminhado a turbinas para geração de eletricidade, esta ação reduz a dependência dos combustíveis

fósseis, devido ao aproveitamento do calor gerado (CHUNBAO e LANCASTER, 2011).

A combustão de lodo pode ocorrer em plantas específicas (monocombustão) ou em processos que promovam a combustão do lodo juntamente com outras fontes (co-combustão). Na planta de mono combustão constata-se elevado custo das instalações, sendo indicada somente para atender a geração de lodo para populações de 200 a 800 mil habitantes. Para a viabilidade do processamento térmico do lodo é comum a operação com outros resíduos, em especial os resíduos sólidos urbanos (FULLANA, 2001).

Na tabela 6 são explicitadas as vantagens as e desvantagens da mono combustão e da co-combustão com lodo de ETE.

**Tabela 6 - Análise das vantagens e desvantagens da combustão de lodo de ETE.**

<b>Combustão</b>	
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A cocombustão de lodo possui menor investimento.</li> <li>- Liberação de alto poder calorífico e potencial para aproveitamento energético.</li> <li>- Recuperação de energética: reduz os custos operacionais.</li> <li>- Não necessita de a secagem do lodo, havendo somente a necessidade da etapa de desidratação do material.</li> <li>- Elevada redução do volume do lodo, em torno de 90%.</li> <li>- Remoção de praticamente todos os componentes orgânicos.</li> <li>- Possibilidade de reutilização das cinzas.</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo elevado de implantação e operação.</li> <li>- Geração de uma fração sólida de material inertes e de cinzas com elevada índices de de metais pesados.</li> <li>- Potencial de geração de compostos como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl, HF, dioxinas e furanos.</li> <li>- A combustão direta do lodo pode caracterizar incineração</li> <li>- Demanda prévia de desidratação do lodo.</li> <li>- Custos elevados para tratamento de gases.</li> </ul>

Fonte: Adaptado Feam (2012), Garcia et al. ( 2005).

Neste contexto, o lodo de ETE pode ser usado como fonte termal de mono e co-combustão sendo, portanto, classificado como fonte de combustível. Entretanto, alguns estudiosos possuem resistência no emprego de lodo de ETE para este fim. Este fato se dá, devido ao teor de umidade de 75% do lodo, mesmo após o processo de desidratação; a presença da parcela inerte que pode prejudicar o aproveitamento térmico, evidente em

lodo digeridos anaerobicamente; e um poder calorífico somente intermediário (ROSA, 2013 apud GARCIA *et al.*, 2005).

Atualmente tem se destacado o método de aproveitamento termal do lodo através de plantas de cocombustão. Nelas usam-se o lodo de ETE juntamente com outras fontes de biomassa, como resíduos agrícolas, florestais, agroindustriais e resíduos sólidos. Um exemplo de processo de cocombustão é observado nas indústrias cimenteiras (ROSA, 2013).

Estas indústrias contribuem, com 5% da emissão global de CO<sub>2</sub>, sendo, 40% deste total, referente ao uso de combustíveis fósseis para geração de energia. A substituição total ou parcial destes combustíveis por alternativos, tal como lodo de ETE's, agrega um melhor desempenho de eficiência energética da planta. Todavia, a troca de combustível pode agregar a emissão de outros gases além do CO<sub>2</sub>, como o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O, mas estes podem ser controlados pelas altas temperaturas nos fornos e eficiência na combustão (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

De acordo com Rodrigues *et al.* (2013) a combustão da fração orgânica do lodo somente ocorre em temperaturas acima de 200°C. Ao estudar a viabilidade do lodo com fonte de combustível complementar em cimenteiras, avaliou-se uma redução de umidade de 75% para 7%, e o poder calorífico inferior mínimo de 8,3 MJ.kg<sup>-1</sup>. Estas características classificariam o lodo como fonte de combustível viável para tal fim.



**CAPÍTULO II – ARTIGO ORIGINAL****Perspectivas para a ETE Goiânia: estudo de caso***Perspectives for the sewage treatment plant of Goiânia: a case study*Sarah Barbacena<sup>2</sup>, Joachim Werner Zang<sup>2</sup>, Warde Antonieta Da Fonseca-Zang<sup>3</sup>**Resumo**

A maior estação de tratamento de esgotos de Goiânia Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE Goiânia) foi explorada sobre seus aspectos ambientais e processos operacionais. O alto volume de lodo gerado na ETE foi o aspecto motivador inicial da pesquisa, 110 toneladas diárias. Este trabalho levantou aspectos da ETE Goiânia, considerando a gestão, perspectivas e implicações socioambientais. A metodologia baseou-se em check-list e matriz de interações. Estes métodos delinearão atividades e respectivos fatores e impactos ambientais. Os resultados mostram a população de 833 mil pessoas beneficiadas com tratamento de esgoto. A gestão do lodo primário custou (2016) mais de 5,3 milhões de reais para a Empresa de Saneamento de Goiás (SANEAGO). Os impactos ambientais de maior magnitude são o transporte e disposição de resíduos sólidos de areia (863,7 t) e detritos (325,4 t) no Aterro Sanitário de Goiânia, do trajeto do chorume do aterro para a ETE e do recebimento na unidade, de 234,8 mil m<sup>3</sup> dos caminhões limpa-fossa em 2016. A análise de custos de energia elétrica aponta um consumo anual (2016) de cerca de 6 GWh com custo de mais de 3,2 milhões de reais. A destinação principal do lodo é para recuperação de áreas de fazendas em Hidrolândia, GO. Sugestões de minimização desses impactos e de redução de custos seria o aproveitamento do lodo no local da unidade. A tecnologia alternativa de digestão anaeróbia (Biogás) para geração de energia, com aproveitamento do lodo, estimada neste trabalho de 2 até 3,8MW, poderia levar à autossuficiência energética da unidade e mitigaria impactos adversos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo de ETE; Impactos ambientais; Biogás de lodo.

---

<sup>1</sup> Engenheira Ambiental e Sanitarista, aluna de mestrado do Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis (PPGTPS) do Instituto Federal de Goiás (IFG) Goiânia (GO), Brasil.

<sup>2</sup> Pós-doutor pela UFG e pela Universidade de Rostock, Alemanha e Doutor pela Universidade de Mainz, Alemanha. Professor coorientador.

<sup>3</sup> Pós-doutora pela UFG e pela Universidade de Rostock, Alemanha e Doutor pela Universidade de Mainz, Alemanha. Professora orientadora.

## ABSTRACT

The largest sewage treatment plant (STP) in Goiânia Dr. Hélio Seixo de Britto (ETE Goiânia) was explored on its environmental aspects and operational processes. The high volume of sludge generated in the STP was the initial motivating aspect of the research, 110 tons per day. This work has raised environmental aspects and impacts of the ETE Goiânia, considering its management and the different socioenvironmental perspectives and implications. The methodology applied in the case study was based on checklists and on two-dimensional matrices of interactions. These methods outlined the activities and their respective environmental factors and impacts. The results show that the population of 833 thousand people has been benefited of the sewage treatment system and the current management of the primary sludge cost in 2016 more than R\$ 5.3 million Brazilian Real. The most important environmental impacts are related to the transportation and disposal of solid sand (863.7 t) and debris (325.4 t) in the landfill of the municipality of Goiânia, and to the leachate transported from the landfill location to the sewage treatment station, and also the discharge of 234.8 thousand m<sup>3</sup> of the septic cleaner trucks. The alternative anaerobic digestion technology to recover the sludge estimates 2 to 3.8 MW, which could lead to energy self-sufficiency of the unit and to mitigate adverse impacts.

Keywords: sewage sludge; environmental impacts; biogas from sewage sludge.

## INTRODUÇÃO

Segundo a pesquisa do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), foram investidos em 2014 no Brasil mais de doze milhões de reais na área do saneamento básico para os sistemas de tratamento de água e de serviços de esgotamento (afastamento) sanitário. Apesar desse investimento nacional, o índice de atendimento de esgoto ainda é de 57,64%, valor muito inferior se comparado ao índice de atendimento urbano de água de 93,16% (SNIS, 2016).

No estado de Goiás, 95,47% da população urbana são atendidas pela rede de abastecimento de água tratada, valor que supera a média nacional (93,16%), já a coleta de esgoto é de 52,04%, sendo que 85,50% do esgoto coletado são tratados. De acordo com a legislação, a capital Goiânia e sua região metropolitana são abastecidas pela Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte que representa 3,56% da área do território estadual e abastecia em 2010, uma população aproximada de dois milhões de pessoas. A população estadual atual contabilizada em seis milhões de habitantes alcançará oito milhões

em 2035, fato que elucida a importância de investimentos no saneamento básico desta região, principalmente no referente ao tratamento de esgoto (GOIÁS, 2015).

A ETE Goiânia atende grande parte da população da cidade, tratando cerca de 57% do total de esgoto coletado na cidade e gera grandes volumes de lodo primário. Há previsão de aumento do volume de lodo com afinalização da futura etapa secundária biológica (SANEAGO, 2016).

Neste sentido, este trabalho teve por objetivo desenvolver um estudo de caso aplicado na ETE Goiânia para avaliar as atividades impactantes no sistema de tratamento de esgoto, sugerindo alternativa para a gestão do lodo primário gerado diariamente no local.

## **METODOLOGIA**

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, esta é de natureza aplicada e com parceria da Empresa de Saneamento do Estado de Goiás (SANEAGO). Os parâmetros metodológicos orientadores são aqueles propostos por Silva e Menezes (2005) com abordagens qualitativas e quantitativas, segundo os objetivos do estudo, conduzidos na forma de estudo de caso. Foi conduzida a revisão bibliográfica sistemática com o intuito de atualizar e aprofundar os conhecimentos da área de pesquisa e das tecnologias existentes para a gestão do lodo de ETE.

Esta pesquisa tem sido conduzida a partir de uma parceria entre o Instituto Federal de Goiás (IFG) e a SANEAGO. A parceria com a SANEAGO foi iniciada com o encaminhamento do ofício da coordenação do programa de mestrado do IFG para a SANEAGO, em fevereiro de 2016, solicitando apoio para o desenvolvimento deste projeto. O levantamento de dados preliminar foi feito no local da pesquisa, Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Britto no município de Goiânia (ETE Goiânia), e posteriormente foram elaborados formulários estruturados, questionários e planilhas de trabalho de campo, os quais foram aplicados entre julho de 2016 a fevereiro de 2017.

Os diversos trabalhos de campo e visitas no local favorecerem o reconhecimento da área de estudo, identificação de pontos críticos e coleta de informações técnicas junto a equipes responsáveis pelo gerenciamento da unidade da ETE. Na observação sistemática dos aspectos ambientais no local, foi incluído um trabalho de campo no Aterro Sanitário de Goiânia, em 27 de março de 2017, para verificar a logística de transporte de

lixiviado do aterro (chorume) para a ETE e de destinação final do lodo da ETE para o aterro.

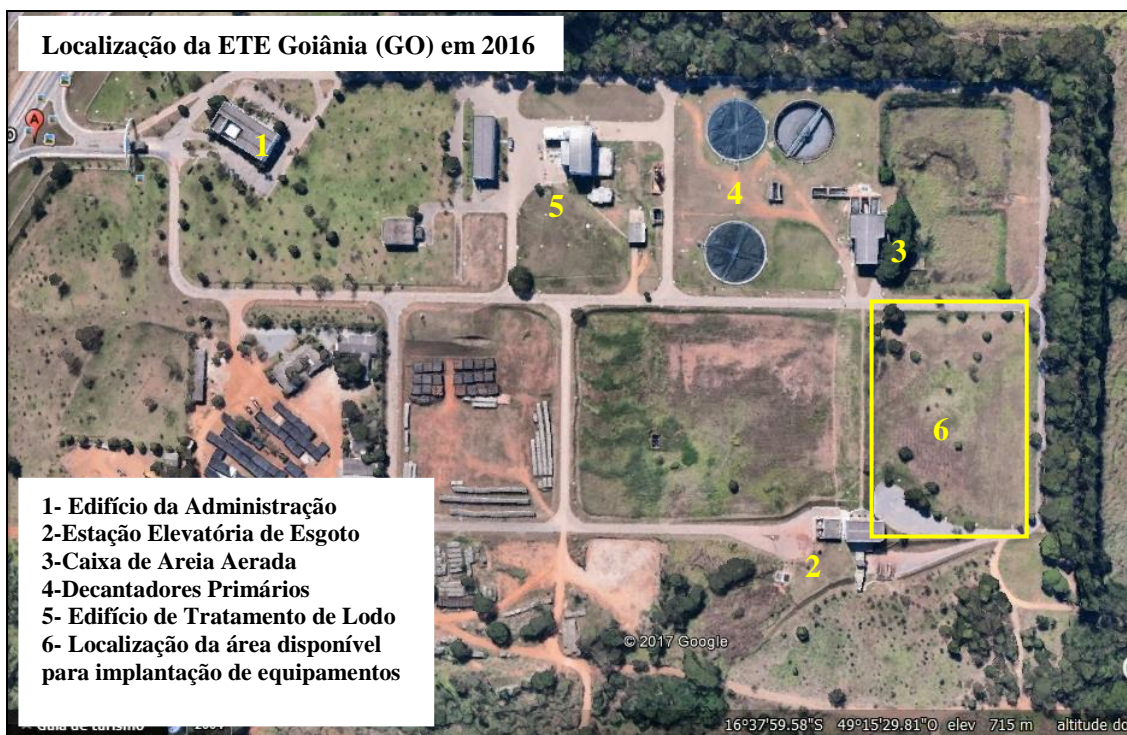
A escolha da ETE Goiânia para promoção deste estudo ocorreu devida sua importância e representatividade junto a SANEAGO, além do seu atendimento a grande parte da população do município. Acrescido a isto, a alta geração de lodo primário e a previsão de formação de um volume ainda maior com a finalização da etapa secundária, que está em andamento, é uma problemática cotidiana da unidade (SANEAGO, 2017).

Os setores da SANEAGO colaboradores nas informações foram da Gerência de Tratamento de Esgotos. A pesquisa, desde sua concepção, tem sido aprovada pela SANEAGO, fato este que contribui para atingir os objetivos traçados, acrescido a esta premissa, a observação sistemática dos aspectos ambientais da ETE Goiânia, sua situação e logística de destinação do lodo representam o escopo do trabalho.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Caracterização geral da ETE Goiânia**

A ETE Goiânia situa-se próxima às margens do Rio Meia Pontena Avenida Perimetral Norte, no setor Goiânia II, na cidade de Goiânia, GO., nas seguintes coordenadas geográficas: 16°38'11,84" S 49°15' 52,39"W. A ETE foi inaugurada em 2003 e entrou em operação em 2004. A área apresenta topografia plana com total de 456 mil metros quadrados, sendo 61% desta área ocupada e 38% de área construída. A ETE tem capacidade de tratar até 2.300 L·s<sup>-1</sup> e recebeu no ano de 2016, uma vazão média de 1.615 litros por segundo (L·s<sup>-1</sup>) de esgoto, 4% a mais que em 2015, 1.547 (L·s<sup>-1</sup>). Segue a figura 12 com imagem de satélite da ETE Goiânia.



**Figura 12 - Imagem de satélite da localização da ETE Goiânia e suas etapas de operação.**

*Fonte: Google Earth Pró versão 7.1.8.3036, 2017.*

A rede coletora de direcionamento de esgoto sanitário que chega na ETE Goiânia possui a extensão de 3.552.955 metros, incluindo os interceptores João Leite, Cascavel, Botafogo e Macambira e está conectada a ela 353.888 ligações domiciliares (SANEAGO, 2016).

A população urbana atendida com a coleta de esgoto é de 1.265.311 habitantes, sendo desta o equivalente a 833 mil e 158 habitantes, os quais possuem seus esgotos tratados pela ETE Goiânia (SANEAGO, 2016). Considerando o total da cidade de um milhão, quatrocentos e quarenta e oito mil e trinta habitantes (IBGE, 2017), a estimativa de atendimento da ETE Goiânia chega ao atualmente a 57,51% da população de Goiânia.

### **Tratamento de esgotos na ETE Goiânia**

A concepção de projeto da ETE Goiânia considerou o tratamento dos esgotos com as fases preliminar, seguida da primária, quimicamente assistida, e a secundária, sendo esta ainda em fase de implementação, e que será constituída de tratamento biológico com uso de lodos ativados (previsão ainda para 2017). Este trabalho fez referência às etapas de tratamento preliminar (gradeamento e desarenação) e a etapa primá-

ria do tratamento de esgotos em atividade na ETE Goiânia. Ou seja, não foram ressaltadas as operação e execução do tratamento biológico no local da pesquisa.

### **Tratamento preliminar**

O processo de tratamento em atividade atualmente na ETE Goiânia é o denominado primário quimicamente assistido e abreviado como CEPT, a partir da denominação em inglês “Chemical Enhanced Primary Treatment” (METCALF; EDDY, 2016).

A alta demanda volumétrica do esgoto bruto, vazão média de  $1.615 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , motivou a planta dessa unidade de tratamento, que de acordo com informações dos técnicos e engenheiros da SANEAGO, o tempo hábio médio do tratamento do esgoto bruto é de aproximadamente três horas.

O tratamento inicia-se com a chegada de esgoto bruto à ETE, a uma profundidade de 20 metros, a partir da contribuição do interceptor Anicuns que possui 2.000 milímetros de diâmetro. Imediatamente, o efluente passa pelo gradeamento grosso de espaçamento de vãos de 7,5 centímetros e é levado para o edifício de bombas. Vale ressaltar que, o descarregamento de caminhões limpa-fossa e do chorume do aterro do município é feito antes da etapa preliminar de tratamento do esgoto bruto. O aspecto visual dos resíduos sólidos retirados desta etapa é observado na figura 13.1a.

A Estação Elevatória de Esgoto Bruto (EEEB) possui um poço de sucção e edifícios de bombas que são responsáveis pelo recalque do efluente para as próximas fases. O edifício de bombas possui quatro bombas tipo centrífugas de eixo vertical prolongado com potência de 750 CV. Devido o volume de esgoto demandado, a ETE Goiânia faz uso de somente de duas bombas de operação independentes, com tubulação de sucção e de recalque próprio, permanecendo as outras duas como reserva. O aspecto visual do esgoto bruto é mostrado na figura 13.1b.

Após o recalque, o efluente é levado para o gradeamento fino de cerca de 6 milímetros, onde há um sistema de gradeamento mecanizado que funciona de forma rotacional e contínua. Esta etapa opera pela ação de um moto redutor que remove os sólidos mais finos existentes no efluente através do reduzido espaçamento de suas grades. Os resíduos são direcionados para uma esteira rotativa e, posteriormente, para uma caçamba que acondiciona e é direcionada para disposição no aterro sanitário do

município de Goiânia. As figuras 13.1c e 13.1d mostram o funcionamento e os resíduos retirados do gradeamento fino.

A unidade de desarenação projetada imediatamente após o gradeamento fino é do tipo caixa de areia aerada, caracterizada pela existência de sopradores de deslocamento positivo instalados na parte inferior do tanque. A unidade é composta por três tanques de capacidade máxima de  $1.700 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  cada ( $15,0 \times 6,0 \times 5,75 \text{ m}$ ), dois deles são usados simultaneamente ficando um de reserva. A deposição da areia no fundo do desarenador é potencializada com a agitação do sistema aerado do tanque, que sedimenta a matéria sólida rotineiramente chamada de “areia”. A areia acumulada no fundo do tanque é removida por um parafuso transportador que a desloca para um nível altimétrico superior destinando-a para uma esteira rotativa e posteriormente para uma caçamba que armazena para seu transporte para o sanitário do município de Goiânia. As figuras 13.2e, 13.2f, 13.2g mostram a estrutura, as dimensões da caixa de areia e o aspecto visual da areia decantada.

O cloreto férrico, insumo químico coagulante, é adicionado a jusante da unidade de desarenação, e necessita de agitação para sua mistura no efluente, proporcionado pelo torbilhonamento existente entre a caixa de areia e a Calha Parshall. Na passagem pela Calha Parshall, ocorre a mistura rápida do insumo químico e o esgoto doméstico, além da aferição da vazão afluyente ao sistema da ETE Goiânia com o uso de um medidor ultrassônico de nível. Este medidor de vazão é o único responsável pela aferição da vazão afluyente ao sistema da ETE Goiânia.

Imediatamente após a passagem na calha, há a adição de um polieletrólito aniônico de alto peso molecular, responsável por auxiliar a floculação no decantador primário. Na sequência, o esgoto é encaminhado para uma caixa de distribuição para o início do tratamento primário. A figura 13.2h mostra uma foto da adição do cloreto férrico no esgoto, sendo a imagem feita no trabalho de campo.



(a) Resíduos retirados da grade grossa.



(b) Imagem do esgoto bruto que chega na ETE Goiânia.



(c) Grade fina em operação.



(d) Resíduos retirados do gradeamento fino.

Figura 13.1 Detalhes do tratamento preliminar, julho de 2016





(e) Estrutura da caixa de areia.



(f) Dimensões da caixa de areia.



(g) Aspecto visual da areia retirada do desarenador.



(h) Adição de cloreto férrico.

Figura 13.2 Detalhes do tratamento preliminar, julho de 2016.

### Tratamento primário

Na caixa de distribuição, o efluente é propagado de forma homogênea para os três decantadores primários com capacidade de  $1.300 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  cada. Estes são decantadores primários circulares detentores de varredores giratórios, uma coluna de dispersão do efluente, uma zona

de floculação e uma cortina de distribuição do efluente clarificado. A figura 14 mostra o funcionamento do decantador primário (imagem de trabalho de campo).



**Figura 14. Decantador primário em funcionamento.**

O efluente entra no sistema por um fluxo ascendente e permanece retido por aproximadamente uma hora, tempo suficiente para promover a decantação do material sólido para o fundo do tanque, onde é formado o lodo primário.

O lodo primário flui para o poço de lodo através da raspagem feita por uma ponte removedora de lodo e espuma que circula pelo tanque, raspando o fundo e removendo o material flutuante simultaneamente. O resíduo flutuante é retirado manualmente, acondicionado em caçamba e destinado para o aterro sanitário, juntamente com os detritos e a areia (etapa preliminar). A figura 15b mostra o aspecto do resíduo flutuante.

O lodo primário é bombeado na Estação Elevatória de Lodo Primário (EELP) e destinado para um tanque de armazenamento no edifício de tratamento de lodo. Neste local, o lodo passa pelo processo de secagem mecânica por centrifugação (desaguamento) e é estabilizado por meio da calagem (Cal), que propicia a diminuição de patógenos e melhora seu manuseio para destino final. As figuras 15c e 15d mostram o carregamento de lodo primário no caminhão e seu aspecto após a calagem.

Os efluentes clarificados dos decantadores primários (figura 15a) são lançados diretamente no Rio Meia Ponte, por gravidade, através de um canal de concreto. Atualmente a remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) está na faixa de 40 a 50 %.



(a) Efluente tratado na cortina de distribuição.



(b) Resíduo flutuante retirado pelos varredores giratórios do decantador primário.



(c) Lodo carregado em caminhão.



(d) Detalhe do carregamento do lodo após o tratamento (cal).

**Figura 15. Detalhes do tratamento primário quimicamente assistido, julho de 2016.**

### **Aproveitamento do Lodo da ETE Goiânia**

Os dados coletados na pesquisa em consonância com as informações levantadas junto a gestão da SANEAGO foram tratados para avaliar os impactos potenciais na sociedade e no meio ambiente.

O diagnóstico ambiental da ETE Goiânia, alcançado nesta pesquisa, apresenta os aspectos ambientais mais relevantes e seus impactos identificados, possibilitando conferir que o volume do lodo primário gerado diariamente representa atualmente a principal problemática da unidade de tratamento de esgoto. A avaliação de impactos ambientais contribui para propor técnicas de aproveitamento do lodo diante de um cenário atual e futuro.

A ETE Goiânia gera atualmente aproximadamente 110 toneladas diárias do resíduo sólido de lodo primário de ETE. Esse lodo é composto por água e matéria seca, sendo 75% de água e 25% de matéria seca. Atualmente a SANEAGO possui duas alternativas de destinação para este resíduo, sendo prioritariamente, seu uso (destinação) para recuperação de áreas de pastagens no município de Hidrolândia/GO, sendo seu excedente, eventualmente, disposto no aterro sanitário do município. A seguir está descrito a tabela 7 com a análise de macronutrientes do lodo da ETE Goiânia.

**Tabela 7. Macronutrientes do lodo de ETE no ano de 2016.**

Mês	Nitrogênio (g/kg.N)		Fósforo (g/kg. P-PO <sub>4</sub> )	
	Antes de adição de cal	Após a adição de cal	Antes de adição de cal	Após a adição de cal
Janeiro	10,36	5,32	-	-
Fevereiro	-	-	-	-
Março	-	-	3,40	3,10
Abril	-	-	-	-
Maiο	19,40	8,47	4,20	3,10
Junho	-	-	4,50	5,30
Julho	19,04	12,88	12,47	10,70
Agosto	-	-	9,80	6,00
Setembro	37,52	15,12	2,30	1,80
Outubro	16,80	21,84	6,10	3,20
Novembro	20,20	19,60	2,80	1,30
Dezembro	18,48	8,96	5,40	4,00
<b>Média 2016</b>	<b>20,26</b>	<b>13,17</b>	<b>5,69</b>	<b>4,28</b>

Fonte: SANEAGO (2016), adaptado pelo autor.

As informações na tabela 7 sobre as características nutricionais de Nitrogênio e Fósforo do lodo são relevantes para a sua destinação atual de recuperação de pastagens. Vale ressaltar, que o processo de higienização química usado (calagem) gera uma queda na quantidade de nitrogênio (35%) e fósforo (25%) disponíveis no lodo.

Segundo o estudo de Bettiol e Camargo (2006) realizado em ETE's de esgotos domésticos, o teor médio de nitrogênio e fósforo nos lodos foi de 64,0 g/kg e de 16,7 g/kg respectivamente. O observado de nitrogênio e fósforo nesta pesquisa do lodo da ETE Goiânia mostra-

se menor que os valores obtidos pelo referido autor. O uso pelos fazendeiros do lodo da ETE Goiânia na atual gestão da Saneago contribui para regenerar as características do solo degradado.

Para fins de aproveitamento energético do lodo, foram estudadas, tanto no quesito teórico quanto no técnico, diversas alternativas podem viabilizar, auxiliar ou até mesmo substituir sistemas de tratamento planejados pela atual gestão da Saneago.

A viabilidade de implantação das tecnologias para aproveitamento do lodo leva em conta aspectos técnicos-ambientais e socioeconômicos e mesmo políticos. Para isso, foram verificados dados vinculados ao funcionamento operacional da ETE e também informações diversas, tais como:

**a) Dados fornecidos pela ETE Goiânia:**

- ✓ Levantamento da demanda de energia elétrica da concessionária CELG com estimativa de custos mensais e anuais;
- ✓ Custos com disposição e transporte do lodo de ETE para uso agrícola e ocasionalmente para o aterro sanitário;
- ✓ Área disponível para implantação de equipamentos;

**b) Contribuição da pesquisa:**

- ✓ Estimativa de aproveitamento energético do lodo com tecnologia proposta de biodigestão anaeróbia;

**c) Sugestão para a SANEAGO, como desdobramento desta pesquisa:**

- ✓ Estudo dos impactos inerentes da implantação do projeto de aproveitamento do lodo com tecnologia proposta de biodigestão anaeróbia;
- ✓ Vantagens e desvantagens da tecnologia sugerida;
- ✓ Custos iniciais de investimento e retorno financeiro;
- ✓ Destino ou uso adequado para os produtos e subprodutos gerados na execução do projeto; e
- ✓ Estimativa de custos de operação e manutenção da tecnologia proposta.

### **Consumo energético da ETE Goiânia**

Para verificar a viabilidade econômica do uso do lodo de ETE no aproveitamento energético foram coletados dados referentes ao consumo energético da ETE. Estas informações estão descritas na tabela 8.

**Tabela 8 – Estimativa de custo referente a energia elétrica**

Período (mês)	Consumo total faturado (kWh)	Valor médio das faturas (R\$)
Janeiro	452222,40	R\$ 241.458,49
Fevereiro	518785,68	R\$ 276.999,12
Março	475627,32	R\$ 253.955,25
Abril	540246,00	R\$ 288.457,59
Maio	439767,72	R\$ 234.808,47
Junho	513235,80	R\$ 274.035,83
Julho	465496,92	R\$ 248.546,25
Agosto	470863,68	R\$ 251.411,77
Setembro	548147,04	R\$ 292.676,25
Outubro	533642,76	R\$ 284.931,87
Novembro	518630,28	R\$ 276.916,15
Dezembro	550011,00	R\$ 293.671,49
<b>Total acumulado 2016</b>	<b>6.026.676,6</b>	<b>R\$ 3.217.868,55</b>
Custo por kWh, dezembro de 2016.		R\$ 0,53

Fonte: SANEAGO (2016), adaptado pelo autor.

A estimativa de custos com energia elétrica descrita na tabela, agrega um valor anual de aproximadamente três milhões e duzentos mil reais de gastos somente com eletricidade, equivalente a 6 GWh, para manutenção das unidades existentes na ETE. Este dado comprova a necessidade imediata de substituição da fonte energética convencional fornecida pela concessionária CELG por uma fonte renovável.

### **Custos com disposição e transporte do lodo**

#### ***Higienização e estabilização química***

O processo de calagem para higienização do lodo demandou em março de 2017 o equivalente a R\$ 42.427,00 reais, valor esse, levantado na pesquisa, e que segundo a SANEAGO, leva ao custo anual médio de R\$ 500 mil reais. Além da calagem, é aplicado o polímero catiônico (condicionamento químico) para auxiliar o processo de desaguamento (centrifugação). O custo do polímero, dado levantado março de 2017, correspondeu a R\$ 104.614,00 o que leva ao custo anual médio de mais de um milhão e duzentos e cinquenta mil reais (R\$1.250.000,00).

#### ***Transporte do lodo***

A principal destinação do lodo de ETE atualmente é o uso para beneficiamento pastagens em áreas agrícolas no município de Hidrolândia. Este transporte é feito através do consórcio Rio Vermelho que cobra da SANEAGO aproximadamente 91 reais /tonelada

disposta nas fazendas para transportar e destinar as 110 toneladas diárias de lodo, gerando um custo total de aproximadamente trezentos mil reais por mês. O consórcio Rio Vermelho é responsável pelo licenciamento da atividade, monitoramento do solo antes e após a inserção de dosagem de lodo no terreno, além de coletar amostras de lodo e fazer a análises mensais das características físico-químicas e de macro e micronutrientes (SANEAGO,2017).

Considerando um total de cento e noventa quilômetros de distância de ida e volta da ETE Goiânia as fazendas de destino e que são realizadas dez viagens diárias, totaliza-se uma quilometragem de mil e novecentos quilômetros rodados por dia para a destinação do lodo nas fazendas (SANEAGO, 2016). Estes dados apontam a onerosidade da logística do lodo de ETE para a SANEAGO.

### **Área disponível para implantação de equipamentos**

Segundo SANEAGO (2016), a área disponível no interior da ETE para implantação de equipamentos de aproveitamento e destino do lodo é de aproximadamente seis mil metros quadrados. No decorrer da explanação dos resultados a implantação de tecnologias de aproveitamento energético ou nutricional deve se basear na área desocupada da ETE Goiânia.

### **Avaliação de Impactos Ambientais da ETE Goiânia**

Para o estudo de avaliação de impactos ambientais das atividades operacionais da ETE Goiânia, fez-se o uso de métodos de acordo com o nível de detalhamento informacional coletados. A comparação, análise e interpretação das informações foram construídas de acordo com os aspectos/atividades ambientais identificadas e seu respectivo nível de importância.

Os resultados de coletas e levantamento de dados e sua análise levou a diversas discussões, sendo inicialmente a referente a avaliação de impacto ambiental da ETE Goiânia e seu grande volume de lodo gerado diariamente.

Embora existam diversos métodos, a abrangência foi alcançada a partir da combinação dos métodos de listagem (check-lists) e de matrizes, definidos na condução deste trabalho para esclarecer o funcionamento diário da estação e suas interferências ao ambiente externo.

No decorrer do trabalho, foram definidas as distinções entre os impactos diretos e indiretos, mesurando em escalas preparadas com pesos ou escalas de intensidade ou

amplitude, para identificar dos aspectos ambientais e seus impactos na dinâmica dos sistemas ambientais analisados.

Com uso da técnica de identificação e enumeração dos impactos existentes na ETE Goiânia, do meio físico, biótico e antrópico, essas coletadas em trabalhos de campo e em contatos prévios ou levantamentos de informações junto a SANEAGO, com seus técnicos. Elementos que expressam de forma clara as intervenções que ocorrem ou que podem vir a ocorrer com a presença da ETE na região.

### **Método de Listagem (Check-List)**

Inicialmente foi aplicado o método de Check-list que segundo Bastos & Almeida (2006), a técnica de check-list consiste em identificação e enumeração dos aspectos ambientais e seus impactos na forma de um diagnóstico ambiental do meio físico, biótico e antrópico. Com o check-list avaliou-se qualitativamente as atividades mais relevantes e impactantes na unidade. Em sequência o método de matrizes de interação complementou a ação de AIA com a identificação geral e específica das dificuldades ambientais envolvidas no processo de ETE.

O quadro 1 foi elaborado de acordo com o método de listagens. O check – list apresenta em suas colunas as atividades da ETE, os aspectos, impactos e as consequências socioambientais e em suas linhas a descrição dos efeitos ambientais em cada etapa de tratamento.



**Quadro 1- Método de Check -List dos impactos ambientais da ETE Goiânia.**

ASPECTOS AMBIENTAIS	IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS
Gera resíduos sólidos grossos e finos/ Acondicionamento, transporte e destino dos resíduos para o Aterro Sanitário	Contaminação no meio biótico	Mudança na vegetação original
	Impactos socioambientais	Diminuição da diversidade biológica
		Impacto de vizinhança
		Criação de empregos
		Melhoria no saneamento básico
		Aumento na tarifa de serviços
	Aumento no tráfego de veículos	
Contaminação do ar	Conflito no uso da água	
Bombeamento de esgoto bruto	Contaminação do ar	Exalação de odores
	Contaminação do ar	Emissão gasosa para atmosfera
	Contaminação sonora	Exalação de odores
	Impactos socioeconômicos	Geração de ruídos
		Aumento de consumo de energia elétrica
		Impacto de vizinhança
		Criação de empregos
Melhoria no saneamento básico		
Aumento na tarifa de serviços		
Gera areia/ Acondicionamento, transporte e destino dos detritos para o Aterro Sanitário	Contaminação do solo	Aumento no tráfego de veículos
	Contaminação no meio biótico	Mudança na vegetação original
	Impactos socioeconômicos	Diminuição da diversidade biológica
		Impacto de vizinhança
		Criação de empregos
		Melhoria no saneamento básico
		Aumento na tarifa de serviços
	Aumento no tráfego de veículos	
	Contaminação sonora	Geração de ruídos
	Contaminação do ar	Exalação de odores
Gera lodo primário/ Acondicionamento, transporte e destino do lodo para fazendas ou para o Aterro Sanitário	Contaminação do solo	Emissão gasosa para atmosfera
	Contaminação do solo	Mudança na consistência original do solo
	Contaminação no meio biótico	Uso do solo para recuperação de pastagem
	Impactos socioeconômicos	Mudança na vegetação original
		Diminuição da diversidade biológica
		Incentivo a educação ambiental
		Impacto de vizinhança
		Criação de empregos
		Melhoria no saneamento básico
	Aumento na tarifa de serviços	
Aumento no tráfego de veículos		
Contaminação sonora	Geração de ruídos	
Contaminação do ar	Exalação de odores	
Descarte de efluente no Rio Meia Ponte	Contaminação das águas	Emissão gasosa para atmosfera
	Contaminação das águas	Alteração na qualidade do corpo receptor
	Contaminação no meio biótico	Mudança na vegetação original
	Impactos socioeconômicos	Diminuição da diversidade biológica
		Impacto de vizinhança
		Conflito no uso da água
Melhoria no saneamento básico		
Criação de empregos		
Descarregamento de caminhões Limpa- Fossa	Contaminação do ar	Exalação de odores
	Contaminação do ar	Emissão gasosa para atmosfera
	Contaminação sonora	Geração de ruídos
	Impactos socioeconômicos	Impacto de vizinhança
		Conflito no uso da água
Aumento no tráfego de veículos		

### Método de Matriz de Interação

Com auxílio da listagem de aspectos e impactos ambientais elaborou-se a matriz de interação da ETE Goiânia. Identificou-se as principais atividades impactantes e seus respectivos fatores e/ou impactos ambientais conforme mostra a figura 16.

Segundo sugerido por SÁNCHEZ (2013), definiu-se os indicadores mais relevantes de qualificação dos impactos, que são classificados quanto a natureza (positivo/ negativo), ordem, magnitude (reversível/ irreversível), probabilidade de ocorrência (alta/ média/ baixa),

abrangência (local/regional/estratégico) e frequência (ocasional/ raro de ocorrer/permanente), descritos no quadro 2a. Além disso as gravidades dos impactos foram usados para o enfoque das ações de maior significância no estudo (quadro 2b).

	Meio físico						Meio biótico		Meio antrópico								
	Ar		Água	Solo			Flora	Fauna	População			Socioeconômico					
	Mai cheiro	Queima do Diesel: particulados, CO, CO2	Nível de ruído	Alteração na qualidade do corpo receptor	Contaminação do solo	Uso do lodo para recuperação de pastagem	Diminuição da vida útil do Aterro Sanitário	Mudança na vegetação original	Diminuição da diversidade biológica	Impacto de Vizinhança	Melhora do saneamento básico	Criação de empregos	Aumento de consumo de energia elétrica local	Aumento das tarifas de serviços	Aumento do tráfego de veículos	Incentivo a educação ambiental	Conflito no uso da água
Gradeamento Grosso manual	N Mo AI DL							N V Me In R	N V Me In R	N Mo AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me D L		N Mo Me In R	N Mo Me DE	P Mo Me In R	N V Me In R
Elevatória de Esgoto Bruto	N Mo AI DL	N V B In L	N V AI DL					N V Me In R	N V Me In R	N Mo AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me In L	N I AI DL	N Mo AI DE		P Mo Me In R	N V Me In R
Gradeamento Fino mecanizado	N Mo AI DL	N V B In L	N V B In L					N V Me In R	N V Me In R	N Mo AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me In L	N I AI DL	N Mo AI DE	N Mo Me DE	P Mo Me In R	N V Me In R
Caixa de areia aerada	N Mo AI DL	N V B In L	N V B In L					N V Me In R	N V Me In R	N Mo AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me In L	N I AI DL	N Mo AI DE		P Mo Me In R	N V Me In R
Transporte de areia, detritos, sólidos grosseiro e chorume de aterro sanitário	N V AI DR	N I AI DR	N Mo AI DR		N V AI DR			N V Me In R	N V Me In R	N I AI DR	P Mo Me In R	P Mo Me D L		N Mo AI DE	N I AI DE	P Mo Me In R	
Decantação Primária	N Mo AI DL	N V B In L	N V B In L		N V Me DL			N V Me In R	N V Me In R	N Mo AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me In L	N I AI DL	N Mo AI DE		P Mo Me In R	N V Me In R
Transporte do Lodo estabilizado	N V AI DR	N V AI DR	N Mo AI DR		N V AI DR			N V Me In R	N V Me In R	N V AI DR	P Mo Me In R	P Mo Me D R		N Mo AI DE	N V AI DE	P Mo Me In R	
Disposição do lodo em fazendas	N V AI DR		N V B In L		N V AI DR	P V AI DE		N V AI DE	N V AI DE	N V AI DE	P Mo Me In R	P Mo Me D R		N Mo AI DE		P Mo AI In E	
Disposição de detritos, areia e sólidos grosseiros para o aterro sanitário	N V AI DR		N V Me DL		N V AI DR		N I AI DE	N I AI DE	N I AI DE	N I AI DE	P Mo Me In R	P Mo Me D R		N V AI DE		P Mo Me In R	
Descarte de efluente tratado da ETE no Rio Meia Ponte	N Mo AI DR			N V AI DR	N V Me DR			N V AI DE	N V AI DE	N I AI DR	P Mo Me In R	P Mo Me In L		N Mo Me In R		P Mo Me In R	N I AI DE
Descarregamento de caminhões limpa-fossa	N I AI DR	N I AI DR	N I Me DL	N V B In R	N V Me DR			N V Me In R	N V Me In R	N I AI In R	P Mo Me In R	P Mo Me D R		N Mo Me In R	N I AI DE	P Mo Me In R	N V Me In R

Figura 16 - Matriz de interações das atividades versus fatores e impactos ambientais da ETE Goiânia.

**Quadro 2 – Legenda da matriz de interações: (a) critérios de classificação de impactos e suas abreviações e (b) gravidades dos impactos ambientais da matriz.**

Critérios de classificação de impactos ambientais		
Natureza	Positivo	<b>P</b>
	Negativo	<b>N</b>
Magnitude	Relevante	<b>V</b>
	Altamente relevante	<b>I</b>
	Moderada	<b>Mo</b>
Probabilidade de ocorrência	Alta	<b>Al</b>
	Média	<b>Me</b>
	Baixa	<b>B</b>
Ordem	Direto	<b>D</b>
	Indireto	<b>In</b>
Abrangência	Local	<b>L</b>
	Regional	<b>R</b>
	Estratégica	<b>E</b>

(a)

<b>Impacto altamente relevante</b>	
<b>Impacto com probabilidade de ocorrência alto</b>	
<b>Impacto positivo</b>	
<b>Interações irrelevantes</b>	

(b)

Fonte: SÁNCHEZ (2013), adaptado pelo autor.

Os resultados quantitativos das interações da matriz de impactos (figura 16) estão na tabela 9.

**Tabela 9 – Resultados quantitativos das interações identificadas na matriz e a cor referente à gravidade do impacto ambiental.**

Células sem interações (branco)	56
Interações altamente relevantes (vermelho)	18
Interações com probabilidade de ocorrência alta (amarelo)	33
Interações positivas (verde)	34
Células com interações irrelevantes (cinza)	46
<b>Total de interações</b>	<b>187</b>

Fonte: Autor

Os resultados das relações da matriz na tabela 9 mostram 187 no total, destas 131 células com interações, sendo 18 altamente relevantes, 33 impactos negativos com alta probabilidade de ocorrência, 34 impactos positivos e 46 células com interações irrelevantes. O quantitativo de 56 células indica as atividades sem afinidade com os fatores ambientais considerados (branco).

### ***Impactos de magnitude alta relevância***

Esta categoria resultou somente 9,63% do total de interações, ela se deu através da classificação de natureza negativa e de dano ambiental de alta magnitude. As atividades são: (i) que envolvem transporte e disposição no aterro sanitário dos detritos, areia e resíduos sólidos; (ii) do transporte vindo de diferentes localidades e descarregamento de efluente séptico de

caminhões limpa-fossa na ETE; (iii) ainda, os fatores ligados aos impactos de vizinhança e conflitos do uso da água do Rio Meia Ponte. Estes impactos são considerados como pouca ou mínima probabilidade de serem cessadas.

Ainda, no que se refere a atividade de transporte e disposição de detritos, areia e resíduos sólidos no aterro sanitário, não há, atualmente, outro destino para esses resíduos. Ver tabela 10 com resultado do volume de areia gerado e transportado para o aterro sanitário, total de 863,7 toneladas entre janeiro e novembro de 2016.

**Tabela 10 – Volume gerado de areia, detrito e limpa-fossa no ano de 2016 na ETE.**

Mês	Vazão média de areia e detritos (m <sup>3</sup> ·mês <sup>-1</sup> )	Areia removida (kg)	Detritos removidos (kg)	Volume médio de limpa-fossa (m <sup>3</sup> )
Janeiro	4.405.968	62.670	17.000	20.700
Fevereiro	4.250.880	90.430	12.070	21.570
Março	4.462.214	100.090	51.280	21.600
Abril	4.209.408	96.720	26.530	21.570
Mai	4.309.546	74.340	26.550	19.230
Junho	4.229.194	70.280	26.140	18.450
Julho	4.076.525	93.680	41.870	17.280
Agosto	4.001.530	64.110	37.520	18.420
Setembro	3.789.504	61.260	22.860	18.090
Outubro	4.213.123	55.590	32.741	18.570
Novembro	4.100.544	94.540	30.810	18.780
Dezembro	-	-	-	20.490
Média	4.186.221	78.519	29.579	19.563
<b>Total 2016</b>	<b>46.048.436</b>	<b>863.710</b>	<b>325.371</b>	<b>234.750</b>

Fonte: SANEAGO (2016), adaptado pelo autor.

Segundo a SANEAGO (2017), em 2016 foram removidos do esgoto bruto em média 78.519 kg de areia mensais, sendo os picos de maior geração nos meses de março, abril, julho e novembro, gerando um total de 863.710 kg de areia removidos até o mês de novembro de 2016. Na coleta de dados observou-se que a vazão média de areia e detritos foram igual neste período.

Em relação aos detritos, o quantitativo fornecido pela SANEAGO classifica os detritos como todos os resíduos oriundos do gradeamento grosso, fino e de flotação do decantador primário. Segundo a empresa eles são coletados individualmente, mas para facilitar o transporte, são misturados e encaminhados para o aterro.

Segundo os dados da tabela 10, até novembro de 2016 foi gerado um total de aproximadamente 325,371 toneladas de detritos, obtendo picos no mês de março e julho. O total acumulado em 2016 foi calculado para onze meses, já que os dados foram coletados antes do fechamento do relatório anual de 2016, ficando em aberto o mês de dezembro.

O município, a partir da administração do aterro, tem um acordo de cooperação com a ETE para receber os resíduos sólidos da unidade de tratamento de esgoto e ocasionalmente o lodo de ETE. Neste parceria, o aterro encaminha seu lixiviado ou chorume de aterro para a ETE, de modo que o mesmo possa ser tratado junto com o esgoto doméstico. O chorume do aterro é inserido em uma entrada especial, adaptada para conduzi-lo para o tratamento do esgoto. A tabela 11 descreve o volume de chorume inserido na ETE Goiânia ao longo do ano de 2016.

**Tabela 11 – Volume recebido de chorume no ano de 2016 na ETE.**

Mês	Volume médio de chorume (m <sup>3</sup> )
Janeiro	21.746,88
Fevereiro	7.983,36
Março	9.745,92
Abril	5.261,76
Mai	5.002,56
Junho	6.272,64
Julho	4.665,60
Agosto	4.510,08
Setembro	3.862,08
Outubro	7.879,68
Novembro	8.475,84
Dezembro	10.679,04
Média	7.076,16
<b>Total 2016</b>	<b>96.085,44</b>

Fonte: SANEAGO (2016), adaptado pelo autor.

Percebe-se o alto volume de lixiviado de Aterro que a ETE recebe todos os meses, em especial no período chuvoso, dezembro e janeiro, chegando a valores maiores que dez mil metros cúbicos mensais. Devem ser considerados no tratamento da ETE Goiânia, os aspectos de periculosidade do chorume do aterro. A frequência de encaminhamento de chorume do aterro para a ETE, sendo verificada como variável, dependendo da estação seca e chuvosa da região, de abril a setembro e de outubro a março, respectivamente. A concentração de metais

pesados, moléculas sintéticas não biodegradáveis e resistentes no ambiente (hormônios, antibióticos), ainda patógenos, representam fatores a serem incluídos como alteradores da qualidade ambiental e com isso, a serem incluídos na discussão.

Quanto a disposição de lodo de ETE para o aterro, em visita realizada neste local identificou-se que a ETE Goiânia não está destinando lodo para o aterro, esta atividade cessou em setembro de 2016, e segundo a SANEAGO, não há previsão de sua retomada.

O descarregamento de caminhões limpa-fossa ocorre diariamente no gradeamento grosseiro sendo seu quantitativo demonstrado tabela 10. Estes efluentes possuem origem doméstica e segundo a SANEAGO não causa qualquer interferência nas análises físico-química do esgoto bruto. Vale salientar que já houve casos de contaminação de efluentes industriais através dos caminhões limpa-fossa, fato este confirmado por técnicos da ETE. Por isso, há a necessidade de averiguação e fiscalização constante, por parte da SANEAGO, sob estas empresas de prestação de serviço de limpa-fossa.

Os impactos de vizinhança existente entre a ETE Goiânia e a comunidade local e regional são diversos. Impactos no ar, emissões de gases de combustão e outros, e a distância de trajeto dos caminhões (consumo de diesel) entre a ETE Goiânia e o Aterro sanitário, são ainda inevitáveis, já que não há método alternativo de destino de areia e detritos diferente do que ocorre atualmente: o aterro. Vale salientar o grande fluxo de veículos pesados provenientes do transporte destes resíduos e seus transtornos regionais.

O carregamento/descarregamento de resíduos da ETE (limpa-fossa, chorume, detritos) é considerado objeto motivador do aumento do fluxo de veículos próximo a ETE Goiânia, contribuindo para a poluição do ar, mal cheiro, aumento no nível de ruídos, gerando impacto de vizinhança, devalorização imobiliária e mudança na paisagem. Todos estes impactos negativos, e não podem ser sanados atualmente.

O lançamento do efluente do tratamento primário quimicamente assistido da ETE no Ribeirão Meia Ponte foi apontado como um dos principais potenciais impactos ligados à subdivisão de uso do solo. Nela está inserido o transtorno a população local em relação ao conflito do uso da água, já que ainda existem diversas propriedades rurais que captam água do deste curso hídrico.

Ainda em relação ao lançamento do efluente tratado no Ribeirão Meia Ponte, foram apontados como impactos negativos de magnitude alta a desvalorização imobiliária, mudança na paisagem original e os impactos na vizinhança de forma geral. O descarte de efluentes da unidade da ETE, apesar de tratado, pode levar, dentre outros, a impactos negativos (alta

probabilidade de ocorrência). Esses lançamentos podem influenciar impactos de alta relevância.

A gestão da ETE pela SANEAGO implanta atualmente o sistema secundário de lodo ativado para o tratamento do efluente primário (atualmente lançado diretamente no corpo receptor, Rio Meia Ponte).

### ***Impactos com alta probabilidade de ocorrência***

Os impactos classificados nesta categoria significou cerca de 17,65% do total das interações, eles possuem valor negativo, magnitude reversível, e com alta probabilidade de ocorrência, já que, em sua maioria há contato direto da atividade com o meio impactante.

A atividade impactante de transporte e disposição de lodo em fazenda se enquadra nesta classificação. No quesito transporte, os impactos são os mesmos dos já citados no item de impactos negativos altamente relevantes. Já a disposição do lodo na área agrícola, essa pode ocasionar, contaminação do solo, mudanças na vegetação original e diminuição da diversidade biológica, podendo ocorrer também diversos impactos de vizinhança (BITTENCOURT, 2012).

Vale salientar que grande parte destes impactos podem ocorrer devido a má estabilização do lodo de ETE, fato este que não se confirma, pois, a análise de coliformes fecais do ano de 2016 fornecidos pela SANEAGO apontam um valor médio de 5 (NMP) após a adição de cal, valor que se encontra dentro dos padrões da EPA (2003) que exige densidade coliformes fecais inferior a 1000 NMP de lodo seco.

Na subdivisão socioeconômica esta atividade promove o aumento do tráfego de veículos e o aumento das tarifas de serviço cobradas pela SANEAGO para o tratamento de esgoto doméstico. Este quadro pode ser alterado, caso haja uma mudança na gestão do lodo com a aplicação de métodos que não necessitem de promover a locomoção deste resíduo para áreas distantes da ETE Goiânia.

O consumo de energia elétrica também foi apontado neste estudo como fator importante, e perfeitamente passível de ser revertido. Este consumo gera impactos principalmente econômicos onerando os custos para a ETE e conseqüentemente para população beneficiada pelo tratamento de esgoto.

### ***Estimativa de aproveitamento do lodo como fonte alternativa de energia:***

Segundo Metcalf e Eddy (2016), o lodo bruto contém uma massa de 100 kg cerca de 70 kg de sólidos voláteis convertíveis por digestão anaeróbia em 30 kg de biogás. Os cerca de

30 kg de sólidos fixos na mesma massa de lodo bruto não sofrem alteração no processo. O biogás produzido do lodo bruto contém de 60 a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e de 25 a 30% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de traços de hidrogênio gasoso, nitrogênio e gás sulfídrico. O poder calorífico do biogás gerado do lodo de 21.000 a 25.000  $\text{kJ/m}^3$  (FNR, 2010) apresenta alto potencial de aproveitamento como fonte alternativa de energia para diversos fins, tais como aquecimento ou secagem térmica do coproduto da digestão anaeróbia, o digestado, que após controle, apresenta potencial de aplicação como biofertilizante.

Considerando a população urbana atendida pela ETE Goiânia, com coleta e tratamento de esgoto para 833 mil habitantes, a produção de biogás poderia ser estimada (grosseiramente) com base na população atendida, segundo a taxa de produção normal de biometano de 15 a 22  $\text{m}^3/10^3$  pessoas·dia em ETE de esgoto doméstico (Metcalf e Eddy, 2016). Assim, a estimativa de produção normal de biometano na ETE seria de 12.500 a 18.300  $\text{m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$ , com poder calorífico inferior de 9,97  $\text{kWh/m}^3$  de metano (FNR, 2010). Desta forma, seria possível estimar o potencial da produção de energia elétrica e calorífica num sistema de cogeração. Considerando uma eficiência média de cerca de 40% de geração de energia elétrica e de recuperação de calor para um sistema de cogeração de motor de combustão interna (Metcalf e Eddy, 2016), o potencial estimado de geração de energia elétrica seria entre 50 e 73  $\text{MWh}\cdot\text{dia}^{-1}$  ou uma potência elétrica entre 2 e 3 MW, e o mesmo valor estimado disponível em energia calorífica.

A SANEAGO viabiliza atualmente o projeto de expansão da ETE com o sistema de tratamento secundário por lodo ativado, o que, com o uso do lodo biológico desse sistema de tratamento, poderia aumentar a produção de biometano para 28  $\text{m}^3/10^3$  pessoas·dia, levando a um potencial estimado de geração de energia elétrica de 93  $\text{MWh}\cdot\text{dia}^{-1}$  ou uma potência elétrica de 3,8 MW (Metcalf e Eddy, 2016).

O atual sistema de tratamento de esgoto da ETE consome anualmente cerca de 6,0 GWh com uma potência elétrica média de cerca 0,7 MW ou um consumo de 7,2  $\text{kWh/pessoa}\cdot\text{ano}$ . O potencial estimado de geração de energia elétrica, a partir do biogás do lodo primário, é de 18,2 a 26,6 GWh, anualmente, ou uma potência elétrica entre 2 e 3 MW, o que cobriria totalmente o consumo atual da ETE de 0,7 MW, gerando ainda excedentes entre 1,3 e 2,3 MW, que poderiam ser inseridos no sistema de distribuição elétrica.

No caso de viabilização da expansão do tratamento biológico de lodo ativado, em projeto, e considerando o aumento de geração de biometano, incluindo o lodo biológico, pode ser gerado o volume de 28  $\text{m}^3/10^3$  pessoas·dia, com potencial de geração de energia elétrica de 33,9 GWh anualmente ou uma potência elétrica de 3,8 MW. O projeto de expansão da ETE



com tratamento por lodo ativado aumenta consideravelmente o consumo energético para 33kWh / pessoa·ano (DWA, 2011) e para atender a população de 833 mil habitantes, demandaria o correspondente anualmente a 27,5 GWh ou a potência elétrica média de cerca 3,1 MW. Estima-se, com isso, que a ETE poderá manter sua autossuficiência energética, considerando o potencial de geração de 3,8 MW.

O sistema de aproveitamento do lodo por digestão anaeróbia e cogeração de energia poderia ser viabilizado na área disponível da ETE de seis mil metros quadrados (figura 12), considerada pela SANEAGO como área ociosa, dentro do contexto geral da área total de 456 mil metros quadrados.

### ***Impactos positivos***

As interações positivas identificadas na matriz significaram aproximadamente 18,18% do total de interações observadas, elas são consideradas os impactos positivos no funcionamento da ETE Goiânia. Na categoria de meio antrópico as atividades de um modo geral beneficiam a população proporcionando a melhoria no saneamento básico das comunidades que destinam seus esgotos brutos para a ETE Goiânia. Além disso, há o item de criação de emprego que soma de forma positiva para os funcionários da ETE, prestadores de serviços e terceirizados que necessitam do funcionamento da ETE para manutenção de seus empregos.

Na categoria meio físico, subdivisão solo, há um impacto positivo na disposição de lodo de ETE em áreas de pastagens. Esta disposição leva à recuperação de solos com baixos índices de nutrientes, contribuindo para seu melhoramento e das culturas em desenvolvimento.

A ETE Goiânia contribui para o incentivo à educação ambiental, através das atividades do seu Núcleo de Educação Ambiental (NEA), que recebe regularmente alunos de diversos níveis de ensino de escolas e universidades e promove a visita em todas as suas áreas. Estas visitas objetivam instruir práticas de destinação correta dos resíduos sólidos, de compostagem com a reciclagem de resíduos orgânicos de restos de podas e plantas misturados com lodo biológico (provenientes de ETE's isoladas), além de incentivar o plantio de mudas nativas do Cerrado com um passeio, pelos visitantes, no viveiro existente na sua área verde.

### **Tecnologia de aproveitamento energético e nutricional do lodo de ETE**

A perspectiva geral da rotina de tratamento dos esgotos na ETE Goiânia mostrou o funcionamento em conjunto das unidades existentes e suas limitações. A gestão do lodo é

atualmente a maior problemática, diante dos altos custos vinculados à logística e destino deste resíduo. Mostrou-se que a disposição dos lodos em fazendas contribui para recuperar solos degradados (nutrientes nitrogênio e fósforo). Por isso, é de fundamental importância que este trabalho oriente alternativas para gestão do lodo que visem aproveitamento nutricional e principalmente energético. No decorrer do trabalho foram expostas diversas técnicas de aproveitamento energético do lodo de ETE. Determinou-se direcionar a pesquisa para as tecnologias de secagem do lodo pelo método solar com ou sem uso da cogeração, aproveitamento de biogás a partir do lodo.

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A metodologia de avaliação de impactos ambientais (AIA) de check-list e matriz de impactos utilizada para investigar a situação ambiental da ETE Goiânia levaram à identificação de diversos aspectos que podem nortear a tomada de decisões pela SANEAGO na sua expansão e mitigação de efeitos na saúde da população da cidade e nos recursos naturais da região. Os dados da SANEAGO contribuíram para o entendimento da situação do tratamento dos esgotos domésticos do município, bem como do efluente tratado e lançado no Rio Meia Ponte e da situação do lodo primário gerado. Observa-se que as etapas existentes na unidade de tratamento atingem níveis de redução de matéria orgânica de 40 a 50%, considerando que o projeto tinha previsão de redução mínima de 50% de matéria orgânica. A expansão da ETE, em implementação, segundo a SANEAGO, com um sistema de tratamento biológico de lodo ativado poderá atingir níveis de redução de matéria orgânica acima de 90%.

Impactos de vizinhança nas comunidades próximas à unidade foram observados, tais como poluição do ar por odores e gases de combustão, de ruídos causados pelo transporte de areia, detritos, de lodo estabilizado e também pelo recebimento do chorume do aterro e dos efluentes de limpa-fossa. O deslocamento intenso de caminhões na região do bairro Goiânia 2 aumenta o tráfego de veículos nas vias urbanas. Sendo assim, é notório que os impactos da ETE Goiânia na comunidade local e região próxima sejam considerados intensos, diante da premissa de que só iria haver a interrupção dos mesmos, se a ETE fosse realocada para área distante do perímetro urbano, fato não previsto, segundo a SANEAGO, sendo, portanto, de grande necessidade a criação de mecanismos de manutenção da harmonia entre a empresa e a população local.

Outra questão de impacto relevante é a disposição final de detritos, areia e sólidos grosseiros no aterro sanitário da cidade. Esta atividade é regular, segundo a legislação ambi-

ental, mas contribui para a diminuição da vida útil do aterro, causa mudança na vegetação original, impacta a vizinhança local e até mesmo, no caso de haver expansão de área, poderia levar à desapropriação de terras (casos críticos). Os impactos negativos de alta probabilidade de ocorrência possuem reversibilidade, e com o correto planejamento, podem ser interrompidos ou passíveis de reparação. Tais impactos incluem a disposição de lodo em fazendas no município de Hidrolândia, GO, que leva à mudança da paisagem, possíveis contaminações do solo e aumento da tarifa de serviços devido aos altos custos envolvidos. As despesas gerais da ETE Goiânia orientam os estudos de aproveitamento do lodo, principalmente no referente ao consumo de energia elétrica da unidade, equivalente a 6,04 GWh e custo de mais de R\$ 3,2 milhões de reais (2016). Vale ressaltar ainda, o alto investimento no processo de desaguamento (centrifugação) seguido da higienização do lodo (calagem), sendo necessário, portanto, estabelecer método de aproveitamento energético que elimine ou minimize essas etapas. O custo total da gestão do lodo ultrapassa R\$ 5,3 milhões anuais (2016), agregado aos impactos ambientais identificados, faz deste resíduo o maior desafio ambiental da ETE Goiânia. Estudos de alternativas para o aproveitamento do lodo na área da ETE (no local) podem ser sugeridos neste trabalho, tais como a aplicação de tecnologias sustentáveis como a digestão anaeróbia e conversão de carga orgânica em energia (biogás) para abastecer a própria unidade. Sendo o atual consumo da ETE de 6,04 GWh/ano, com uma potência elétrica média de cerca 0,7 MW ou consumo de 7,2 kWh/pessoa·ano (833 mil pessoas atendidas), estima-se um potencial diário de geração de energia elétrica (biogás do lodo) de 50 a 73 MWh, ou potência elétrica entre 2 e 3 MW, o que cobriria o consumo atual de energia elétrica da ETE de 0,7 MW. O excedente entre 1,3 e 2,3 MW poderia ser inserido no sistema de distribuição elétrica. Esta técnica, além de promover a autosuficiência energética, promove uma economia na etapa de desaguamento, já que o lodo pode ser inserido no biodigestor com a sua umidade original. O processo de calagem ainda irá compor o processo de tratamento, pois é essencial a promoção de um biodigestado de boa qualidade e livre de patógenos. A potencial de expansão da ETE com tratamento biológico de lodo ativado aumenta a geração de biometano de cerca de 25 (lodo primário) para  $28 \text{ m}^3/10^3$  pessoas·dia (lodo biológico), produzindo anualmente 33,9 GWh ou potência elétrica de 3,8 MW. Sistema de lodo ativado demanda alto consumo energético, cerca de 33 kWh/pessoa·ano (DWA, 2011), o que para 833 mil habitantes, com esgoto tratado na ETE, demandaria 27,5 GWh por ano ou a potência elétrica média de cerca 3,1 MW, o que poderá levar a ETE a alcançar sua autosuficiência energética, considerado o potencial de geração de 3,8 MW.

**AGRADECIMENTOS**

Aos setores da SANEAGO colaboradores nas informações, especialmente Kellya de Moraes e Silva, Shirley Queiroz de Roure, da Supervisão operacional da ETE Goiânia e Lu-anna Gonçalves de Paula que atua na Gerência de Tratamento de Esgotos.

**REFERÊNCIAS (ARTIGO)**

BASTOS, A. C.; ALMEIDA, J. R. *Licenciamento ambiental brasileiro no contexto da avaliação de impactos ambientais*. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (org). Avaliação e perícia ambiental. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2006.

BITTENCOURT, Simone et al. *Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado*. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2012, v.17, n.3, p.315-324. ISSN 1413-4152

DWA. **Normas e Recomendações Técnicas DWA-M 361PT - Tratamento de Biogás**. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.. Alemanha, p. 40. 2011.

EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology. *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including Domestic Septage)* under 40 CFR p. 503. revised in 2003, 186 p.

FNR. FachagenturNachwachsendeRohstoffee.V. (FNR). 5 ed. Gülzow, 2010.

GOIÁS (Estado). SECIMA, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, RecursosHídricos, Cidades, Infraestrutura e AssuntosMetropolitanos. PERH/GO – *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás*: Edição do Governo, 2015.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Informativo *sobre o Brasil*. 2017. Disponível em: <http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/relevo-e-clima.html>. Acessoem: 22 fev.2017.

METCALF e EDDY. *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5 ed. Brasil: Editora McGraw Hill, 1927 p., 2016

SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de impactoambiental: conceitos e métodos*. 2 ed. atual. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 583 p.

SANEAGO, Saneamento de Goiás S.A – *Boletim informativo Julho/2016*. Disponívelem: <http://intranet.saneago.com.br/arquivos/boletim3/index.php>

SNIS - SistemaNacional de Informações sobre Saneamento: *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos* - 2014, SNSA/MCIDADES, Ministério das Cidades, SecretariaNacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2016.

## CONCLUSÕES GERAIS DA PESQUISA

Os levantamentos de dados e informações feitos na SANEAGO aliados à coleta de dados de campo com listas de atividades e aspectos ambientais foram analisados através dos procedimentos de avaliação de impactos ambientais e contribuíram para o entendimento da situação da ETE Goiânia, seus impactos e perspectivas futuras.

Quanto à situação atual do seu funcionamento no tratamento dos esgotos domésticos do município, gerenciamento e destinação final do lodo primário, observa-se que as etapas existentes na unidade atingem níveis de redução de matéria orgânica esperados para o tratamento físico quimicamente assistido, já que houve uma estimativa de projeto de redução mínima de 50% da DBO. A ETE Goiânia se encontra em fase de processo de implementação do sistema secundário de tratamento biológico de lodo ativado que pretende atingir níveis de redução de matéria orgânica (DBO) acima de 90%.

Os trabalhos de campo na ETE e no aterro sanitário proporcionaram entendimento sobre o transporte e destino do lodo primário da ETE. Durante anos o lodo é destinado para áreas degradadas e para o aterro (excedente), mas desde setembro de 2016, segundo informações locais, o lodo tem destino somente para a recuperação de pastagens no município de Hidrolândia.

Dentre os dados coletados, incluem os de consumo energético da ETE (concessionária CELG) e suas respectivas estimativas de custos mensais e anuais, dados de custos com a disposição e transporte do lodo de ETE para uso agrícola e ocasionalmente para o aterro sanitário e o levantamento das áreas disponíveis para implantação de equipamentos/tecnologias. Estes dados foram utilizados para embasamento quantitativo de análises de custos na ETE Goiânia. A proposta deste trabalho inclui o estudo do uso do lodo de ETE para aproveitamento energético, com isso, a análise de custos foi fundamental para verificar o dispêndio com custos na sua destinação final, em caso de implantação de alguma das tecnologias propostas. Sendo assim, a ETE Goiânia iria poupar gastos com a logística do lodo e ainda produziria energia elétrica para aliviar as despesas com a concessionária CELG. Vale ressaltar que a implantação de qualquer tecnologia de aproveitamento do lodo no local da ETE Goiânia deverá ser feita em área ociosa existente na unidade.

O método de Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) foi utilizado para investigar todos os aspectos ambientais no funcionamento da ETE e auxiliou na identificação do problema com o lodo primário no estudo de controle e gestão ambiental.

A aplicação da AIA foi feita a partir do levantamento prévio do funcionamento da ETE Goiânia. A aplicação dele fez uso do método de listagem (Check-List) que caracterizou todas as atividades envolvidas no tratamento de esgoto, seus aspectos, impactos ambientais e possíveis danos/ efeitos ambientais.

As informações do check-list possibilitaram a construção da matriz de interações derivando os efeitos/impactos ambientais no meio físico, biótico e antrópico de acordo com as atividades na ETE Goiânia, bem como seus impactos de vizinhança nas comunidades próximas à unidade. As principais interações obtidas com o uso da matriz de interações foram classificadas como: impactos da altamente relevante; impactos negativos com alta probabilidade de ocorrência e impactos positivos.

Os impactos negativos de magnitude irreversíveis foram a minoria (cerca de 9,63%) dentre o total de interações, entretanto possui danos intensos. Uma das principais consequências envolve os impactos de vizinhança e poluição do ar (odores), oriundo do transporte de areia, detritos, de lodo estabilizado, também de recebimento do chorume do aterro e dos efluentes de limpa-fossa. Adicionado a estes, o deslocamento intenso de caminhões na região do bairro Goiânia 2 ocasiona o aumento de tráfego de veículos, a desvalorização imobiliária e a emissão de poluentes atmosféricos (gases de combustão de motor diesel).

Outro ponto de impacto acentuado é a disposição de detritos, areia e sólidos grosseiros no aterro sanitário. Esta atividade é regular segundo a legislação ambiental, mas contribui para a diminuição da vida útil do aterro, causa mudança na vegetação original, impacto de vizinhança e até mesmo, no caso de haver expansão de área, poderia levar à desapropriação de terras (casos críticos).

Sendo assim, é notório que os impactos existentes da ETE Goiânia na comunidade local e regional sejam considerados intensos (irreversíveis) diante da premissa de que só iria haver a interrupção dos mesmos no caso em que a ETE fosse realocada para área distante do perímetro urbano. Não está previsto pela SANEAGO a mudança de local da ETE, sendo, portanto, de grande necessidade a criação de mecanismos de manutenção da harmonia entre a empresa e a população local.

Os impactos negativos com alta probabilidade de ocorrência, possuem reversibilidade, e com o correto planejamento, podem ser interrompidos e são passíveis de reparação. Tais impactos incluem a disposição de lodo em fazendas, que levam à mudança da paisagem, possíveis contaminações do solo e aumento da tarifa de serviços devido aos altos custos envolvidos.

As despesas gerais da ETE Goiânia orientam os estudos de aproveitamento do lodo, principalmente no referente ao consumo de energia elétrica da unidade, equivalente a 6,04 GWh e custo de R\$ 3,2 milhões de reais (2016). O custo da gestão do lodo ultrapassa R\$ 5,3 milhões anuais (2016). Vale ressaltar ainda, o alto investimento no processo de desaguamento (centrifugação) seguido da higienização do lodo (calagem), sendo necessário portanto, estabelecer método de aproveitamento energético que elimine ou minimize essas etapas.

A gestão do lodo gera diversos impactos ambientais e econômicos, e neste estudo, representa o maior desafio ambiental da ETE Goiânia.

Estudos de alternativas para o aproveitamento do lodo na área da ETE (no local) podem ser sugeridos neste trabalho, tais como a aplicação de tecnologias sustentáveis como a digestão anaeróbia e conversão de carga orgânica em energia (biogás) para abastecer a própria unidade. Sendo o atual consumo da ETE de 6,04 GWh/ano, com uma potência elétrica média de cerca 0,7 MW ou consumo de 7,2 kWh/pessoa·ano (833 mil pessoas atendidas), estima-se um potencial diário de geração de energia elétrica (biogás do lodo) de 50 a 73 MWh, ou potência elétrica entre 2 e 3 MW, o que cobriria o consumo atual de energia elétrica da ETE de 0,7 MW. O excedente entre 1,3 e 2,3 MW poderia ser inserido no sistema de distribuição elétrica. A potencial de expansão da ETE com o tratamento biológico de lodo ativado aumenta a geração de biometano de cerca de 25 (lodo primário) para 28 m<sup>3</sup>/10<sup>3</sup> pessoas·dia (lodo biológico), produzindo anualmente 33,9 GWh ou potência elétrica de 3,8 MW. Sistema de lodo ativado demanda alto consumo energético, cerca de 33 kWh/pessoa·ano (DWA, 2011), o que para 833 mil habitantes, com esgoto tratado na ETE, demandaria 27,5 GWh por ano ou a potência elétrica média de cerca 3,1 MW, o que poderá levar a ETE a alcançar sua autossuficiência energética, considerado o potencial de geração de 3,8 MW. Esta técnica, além de promover a autossuficiência energética, promove uma economia na etapa de desaguamento, já que o lodo pode ser inserido no biodigestor com a sua umidade original. O processo de calagem ainda irá compor o processo de tratamento, pois é essencial a promoção de um biodigestado de boa qualidade e livre de patógenos.

A identificação do problema da gestão do lodo de ETE como uma das principais ações impactantes na análise, juntamente com a AIA, leva à necessidade de investir em alternativas tecnológicas com enfoque em aproveitamento energético que pode custear, em parte, as despesas da unidade. Com relação à logística, recomenda-se o uso do lodo no interior da ETE, a fim de minimizar gastos e mitigar os impactos identificados nesta pesquisa com o deslocamento desse resíduo.



De modo a empreender, futuramente, os resultados desta pesquisa, recomendamos a inclusão de dados climáticos; dos impactos de implantação da tecnologia; dos custos iniciais e de operação envolvidos; do destino dos produtos e subprodutos gerados na execução dos projetos; da verificação da produção energética e as vantagens e desvantagens da tecnologia proposta.

Essas informações contribuem para a tomada de decisão quanto às técnicas demandadas pela ETE Goiânia e que agregadas de forma favorável, contribuirão para a melhoria do desempenho técnico, econômico e socioambiental das atividades na unidade.

## REFERÊNCIAS GERAIS DA DISSERTAÇÃO

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9.648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABNT (2004). NBR 10004 - Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 71.

ABREU JUNIOR, C.H.; NOGUEIRA, T.A.R.; OLIVEIRA, F.C.; PIRES, A.M.M. & FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M.O.; MUTTON, M.A.; NOGUEIRA, T.A.R.; TASSO JÚNIOR, L.C. & BERNARDI, J.H., eds. **Tecnologias na agroindústria canavieira**. Jaboticabal, FUNEP, 2008. p.183-210

ABICALIL, M. T. Os serviços de saneamento no Brasil: transformar para universalizar. Rio de Janeiro: FASE/Caixa Econômica Federal, 1998.

ANDREOLI, Cleverson. V.; von SPERLING, Marcos.; FERNANDES, Fernando. ‘**Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final**’. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 484p. 2001.

ANDREOLI, Cleverson V. (coordenador). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 417 p. 2006.

ANGEDALIKI, I; BATSTONE, D. J. Anaerobic Digestion: Process. *Solid Waste Technology & Management*, v.2. Chapter 9.4 Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2010. p. 583-600.

AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C.A.L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n. 4, p 295-304, 2006.

ARAUJO, F. S. D.; **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. 2008. 76 f. Dissertação Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Natal, 2008.

ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

BANDEIRA, O. Despoluição da Baía de Guanabara. *Revista PINI – Infraestrutura Urbana*, Rio de Janeiro, v. 4, junho. 2011. Disponível em: <<http://infr/aestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/4/artigo220154-2.aspx>>. Acesso em: ago. 2016.

BASTOS, A. C.; ALMEIDA, J. R. Licenciamento ambiental brasileiro no contexto da avaliação de impactos ambientais. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (org). *Avaliação e perícia ambiental*. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2006.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. A disposição de lodo em solo agrícola In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A (Coord.). *Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. *Conceitos Básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP, 1999.

BIELSCHOWSKY, M. C.; **Modelo de gerenciamento de lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014.165 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2014.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. New York: Ed. Wiley, 2001. 381 p.

BORGES, A.C. *Influência da estratégia de alimentação no desempenho do reator anaeróbio em batelada sequencial contendo biomassa imobilizada*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2003.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S.H.W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. *Ciência e Energia*, v. 17, p. 27 – 32, 2008.

BRAGA, B. Introdução à engenharia ambiental. 2. ed. Sao Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005, 318 p.

BRÄNDLI, A.C. *et al.* Organic pollutants in compost and digestate. *J. Environ Monit.*, v.9, p.456-464,2007.

BRASIL. Lei no 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, n. 5, 8 jan. 2007. Seção 1, p. 3-7. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm)>. Acesso em: ago. 2016.

BRASIL (2006b). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 375**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 26/08/2016.

BRASIL (2006c). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 380**. Retifica a Resolução CONAMA 375/06. Brasília. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_2006\\_380.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2006_380.pdf)>. Acesso em: 28/08/2016.

BROSTEL, R. C.; SOUZA, M. A. A., Uma proposta para avaliação do grau de impacto provocado por estações de tratamento de esgotos. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 18 a 23 de setembro de 2005 – Campo Grande/MS.

BRUNO, Joan Carles; ORTEGA-LÓPEZ, Víctor; CORONAS, Alberto. Sludge: Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. *Applied Energy*, v.86, p.837-847, 2009

CAMPOS, A. F.; **Aplicação de lodo líquido de esgoto sanitário no solo: determinação de coliformes totais e fecais**. 2002. 78 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2002.

CARVALHO JR., J. A.; MCQUAY, M. Q. Princípios de combustão aplicada. Florianópolis, 2007. 176p.

- CASSINI, S. T. (Coord). *Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás*. 1. Ed. PROSAB- Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210p.
- CARNEIRO, D. R. C. **Viabilidade técnica e econômica de uma unidade centralizada de co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos**. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto – Portugal, 2009.
- CAVALCANTE, J. de; A. *Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha sargassum sp*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2003, 138 p.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental- **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação – P 4.230**. Manual técnico, CETESB, São Paulo, 1999.
- CHERNICHARO, C.A. L. *Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Volume 5 2.ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007. 379p.
- CHUNBAO, C. X.; LANCASTER, J. Treatment of Secondary Sludge for Energy Recovery. In: KÜHTZ, S.; INTINI, F.; BELLINI, S. *Energy Recovery Systems from Industrial Plants Waste*; Matera: Hardcover. 2011, p. 289-310.
- COELHO, S. T., et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Trabalho apresentado no XI Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, 2006.
- CONESA, J. A.; FONT, R.; FULLANA, A.; GULLÓN, M.; ARACIL, I.; GÁLVEZ, A.; MOLTÓ, J.; RICO, M. F. Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.84, p.95-102, 2009.
- CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs). In: ANDREOLI, Cleverton Vitorio (Coord.). **Resíduos sólidos saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1ª ed. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. cap.5.
- COSTA, David Freire da. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, USP, São Paulo, 2006.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an Introduction**. Federal Republic of Germany: Wiley- VCH, Weinheim, 2008, 450p.
- DIAS, E. H.O. **Tratamento do lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de bio sólidos para uso agrícola**. 2012. 141f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- DWA. **Normas e Recomendações Técnicas DWA-M 363: Origem, Tratamento e Utilização do Biogás**. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Alemanha, p. 72. 2010.
- DWA. **Normas e Recomendações Técnicas DWA-M 361PT - Tratamento de Biogás**. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.. Alemanha, p. 40. 2011.

EGAN, M. Biosolids management strategies: a evaluation of energy production as an alternative to land application. **Environmental Science and Pollution Research International**, Landsberg, v.20, p. 4299-4310, 2013.

EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology. *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including Domestic Septage) under 40 CFR part 503*. revised in 2003, 186 p.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field. Combined Heat and Power Partnership, 2011. Disponível em: <http://www.epa.gov/chp/>. Acesso em Jan 2017.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Catalog of CHP Technologies. Combined Heat and Power Partnership, 2008. Disponível em: <http://www.epa.gov/chp/>. Acesso em Jan 2017.

FIGUEIREDO, I. C. **Avaliação de Desempenho do Processo CEPT (Chemically Enhanced Primary Treatment) no Tratamento Primário de Esgotos Domésticos**. 2009. 125 f. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FILHO, J. et al. **Análise da gestão ambiental nas companhias estaduais de saneamento básico**. Revista Alcance – Eletrônica, Santa Catarina, v. 15, nº 03, p. 322 – 342, set/dez. 2008.

Fonda, K.D., Lynch, E., 2009. Going for the green in thermal Drying: evaluation of innovative new technologies and industry trends. In: Proceedings of the Water Environment Federation, Residuals and Biosolids 2009, October 17-21, Chicago, pp. 1019-1043.

FULLANA, A. F. *Pirólisis y combustión de neumáticos y lodos de depuradoras*. 2001. 305p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Alicante, Alicante, 2001.

FUNASA – **FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE**. Manual de Saneamento. Ministério da Saúde. Brasília, 2015.

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.

LA ROVERE, E.L; D' AVIGOGNON, A; PIERRE, C.V; KLIGERMAN, D.C; SILVA, H.V.O; BARATA, M.M.L.E; MALHEIROS, T.M.M. **Manual de Auditoria Ambiental para Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro. Qualitymark. 145p.2002.

FRANÇA, M.; ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C. Avaliação do desaguamento do lodo de esgoto anaeróbio tratado termicamente em leitos de secagem em bancada. In: 22.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Joinville, set., 2003.

FONTANA, Antônio Osmar. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – Estudo de caso – ETA Cardoso**. 2004. 161f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GARCIA, J.; CASTELLS, X. E.; GOYA, J. In: CASTELLS, X. E. Tratamiento y valorización energética de residuos. 2005. Cap. 14, p. 965- 1.133, 2005

GONÇALVES, R.F; LUDUVICE, M; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C.V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFMG. P. 159-259. (Princípios de tratamento biológico de águas residuárias, v. 6) . 2001.

GUTIERREZ, K. G.; Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida. 2014. 115 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GWRC. State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge (Global Water Research Coalition – STOWA, WERF, UKWIR). 2008

IBELLI, B. C. **Caracterização da comunidade procarionte presente no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos em conjunto com serragem e lodo de esgoto**. 2015. 131f. Dissertação Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

IBGE<sup>1</sup> - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em :< [https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2014/12/pnsb\\_ibge-2008-2010.pdf](https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2014/12/pnsb_ibge-2008-2010.pdf)>. Acesso em: ago. 2016.

IBGE<sup>2</sup> - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA Informativo sobre o Brasil. 2017. Disponível em: <http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/relevo-e-clima.html>. Acesso em: 22 fev.2017.

INSTITUTO TRATA BRASIL – Manual do saneamento básico: entendendo o saneamento básico ambiental no Brasil e sua importância socioeconômica, São Paulo, 2012. Disponível em <http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manual-imprensa.pdf> Acesso em: out/2016.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C.A. ‘Tratamento de Esgotos Domésticos’. 6ª Edição. 1050 p., Rio de Janeiro: ABES, 2011.

JUDEX, J. W.; GAIFFI, M.; BURGBACHER, C. Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and pilot plant. *Waste Management*, v. 32, p.719-723, 2012.

KELESSIDIS, A; STASINAKIS, A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, v.32, p. 1186–1195, 2012.

KHANAL, S. K. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Application*. 1 Ed. Published by Blackwell, USA, University of Hawaii, 320p., 2008.

KLIGERMAN, D.C.; VILLELA, H.; BARATA, M.M.L.; Aplicação do instrumento da auditoria ambiental em sistemas de esgotamento sanitário. In: 20.º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. p. 2778-2788 Rio de Janeiro, maio., 1999.

KUMAR A, Tiwari GN, Kumar S, Pandey M . **Role of greenhouse technology in agricultural engineering**. *International Journal of Agricultural Research* 2006;1 (4):364–72.

Leopold, et al. *A procedure for evaluating environmental impact*. Washington, U. S. Geological Survey, 1971. 13p.

**LA ROVERE, E. L.; D' AVIGOGNON, A; PIERRE, C.V; KLIGERMAN, D.C; SILVA, H.V.O; BARATA, M.M.L. E; MALHEIROS, T.M.M.** Manual de Auditoria Ambiental para Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos. **Rio de Janeiro. Qualitymark. 145p. 2002.**

LETTINGA ASSOCIATES FOUNDATION. *Development of decentralised anaerobic digestion systems for application in the UK: phase 1 – final report.* Community Composting Network, 2009. 60p.

LINS, G. A.; **Impactos ambientais em estações de tratamento de esgotos.** 2010. 285 f. Dissertação de Mestrado Profissional – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, 2010.

LOBATO, L. C. D. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** Belo Horizonte: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), 2011

MACHADO, L. L. N.; Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto. 2011.107f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2011.

MALTA, T. S.; **Aplicação de Lodos em Estações de Tratamento de Esgotos na agricultura: Estudo de Caso no Município de Rio das Ostras-RJ.** 2001. 67f. Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 2001.

METCALF E EDDY, *Wastewater engineering: treatment and reuse.* 4. ed., Revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. Published by Mc Graw Hill, USA, 1819 p., 2003.

METCALF e EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5. Ed. Brasil: Editora McGraw Hill, 1927 p., 2016

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa Nacional de capacitação de gestores ambientais: Módulo específico licenciamento ambiental de estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários / Ministério do Meio Ambiente. – Brasília: MMA, 2009.67p.

MODESTO, P. T.; SCABORA, M. H.; COLODRO, G.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Alterações em algumas propriedades de um Latossolo degradado com uso de lodo de esgoto e resíduos orgânicos. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:1489-1498, 2009.

MUJUMDAR, A., ZHONGHUA, W., 2008. Thermal drying technologies e cost-effective innovation aided by mathematical modeling approach. *Dry. Technol.* 26 (1), p 146-154 .

NEBRA-NORTH EAST BIOSOLIDS AND RESIDUALS ASSOCIATION. *A National Biosolids Regulation, Quality, End Use and Disposal Survey, Final Report, North and Residuals Association.* Tamworth: NEBRA, 2007.

NOZAKI, V.T.; Análise do setor de saneamento básico do Brasil. 2007. 109 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - FEA-RP, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

NUNES, José Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais.** 5ª Ed. Aracajú: Info Graphics Gráfica & Editora Ltda, 2008.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola.** 2ª Ed. Edgard Blucher: São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, D.N.S. Efeito do lodo de esgoto e de plantas de cobertura na recuperação de uma área degradada em Brasília-DF. 2015. 61 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

OM, P ; ANIL, K., 2014. Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29 (2014) p 905–910.

PARISOTTO, R. **Identificação e Classificação dos Aspectos e Impactos Ambientais em uma Empresa Metal Mecânica**. 2011. 50 f. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011

PARKSON CORPORATION, 2016. Disponível em: <http://www.parkson.com/sites/default/files/documents/document-thermo-system-print-version-1175.pdf> Acesso em: 21/02/2017.

PEQUENO, P. A. M.; PESSOA, C, A, B. **Ações de capacitação em saneamento básico visando a regulação dos serviços prestados por empresa estatal estadual**. Congresso Brasileiro de Regulação, Brasília, 9, ago/set 2015.

PEREIRA, V. E.; **Disposição de lodo adensado de ETA em ETE com tratamento primário quimicamente assistido**. 2011. 140f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2011.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo. *Altas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos: INPE. 2006. Disponível em: [http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf) Acesso em 22 de fevereiro de 2017.

PESQUISA nacional de saneamento básico 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 218 p. Acompanha 1 CD-ROM. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf). Acesso em: ago. 2016.

PIMPÃO, H.; **Avaliação dos impactos ambientais da estação de tratamento de esgoto do bairro cpaiiii– lagoa encantada em cuiabá/mt utilizando indicadores ambientais**. 2011. 105 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Mato Grosso. Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2011.

PIRES, I,C,G. **Lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*: produção de madeira e viabilidade econômica**. 2015. 88f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015.

PORTAL DO BIOGÁS (2013). Biodigestão Anaeróbia. 2013. Disponível em: <http://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/> >. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

PORTAL DO BIOGÁS (2015). Tecnologias utilizadas em biodigestores. 2015. Disponível em: <http://www.portaldobiogas.com/tecnologias-utilizadas-em-biodigestores/> >. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

PRS. Resíduos Orgânicos - Biodigestor, Compostagem ou Incinerador. Portal Resíduos Sólidos, 2013. Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/residuos-organicos-biodigestor-compostagem-ou-incinerador/> >. Acesso em: 12 de janeiro de 2017.

POLAT, E.; DEMIR, H.; ERLER, F. Yield and quality criteria in organically and conventionally grown tomatoes in Turkey. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 67, n. 4, p 424-429, 2010.



PÖSCHL, Martina; WARD, Shane; OWENDE, Philip. Sludge: Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, v.87, p.3305-3321, 2010.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás, Vitória, ES, 210 p, 2003.

PYCKE, B.F.G.; ROLL, I.B.; BROWNAWELL, B.J.; KINNEY, C.A.; FURLONG, E.T.; KOLPIN, D.W.; HALDEN, R.U. Transformation products and human metabolites of triclocarban in sewage sludge across the United States. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 48, p. 7881-7890, 2014.

QUINTANA, N. R. G. **Análise econômica da aplicação de biossólido na agricultura.**

2006. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S.; MELO, W.J.; Lodo De Esgoto Como Fertilizante: Produtividade Agrícola e Rentabilidade Econômica. *Revista Nucleus*, Ituverava, v. 8, n,1, p 183 – 192. Abr. 2011.

ROSA, A. P. **Aproveitamento de Biogás e Lodo e Excedente de Reatores UASB como Fonte de Energia Renovável em Estações de Tratamento de Esgoto.** Exame de Qualificação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Belo Horizonte. 2012.

REALI, M.A.P. (1999) Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: Abes, 250 p. Disponível em: <<https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-deprogramas/prosab/prosabrealifinal.pdf>> Acesso em: set/ 2016.

REIS, A. Dos S.; *Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

SAMPAIO, C, D, C.; **Análise de viabilidade do uso de adsorventes à base de lodo proveniente de estação de tratamento de efluente na remoção de sulfeto de hidrogênio de corrente gasosa.** 79 p. 2015. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós- Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos** . 2.ed. atual. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 583 p

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná, 2016. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/noticias/rica-visita-obras-de-ampliacao-da-ete-belem-e-da-usina-de-energia>>. Acesso em: Ago/2016.

SANTOS, A. D.; **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo.** 265f. 2003. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2003.

SECIMA. Secretaria Estadual de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura Cidades e Assuntos Metropolitanos. PERHGO – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás, 2015. Atualizado 20 jan. 2016. 290p. Disponível em: <http://www.secima.go.gov.br/post/ver/207710/plano-estadual-de-recursos-hidricos-do-estado-de-goias>

SERENOTTI, F.; **Avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microorganismos em lodo de ETE.** 181 f. 2009. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2009

SILVA, A .V. A. Avaliação do tratamento do lodo da ETE Arrudas- MG (Lodos ativados convencional).108 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

SILVA, R. F. Compostagem e solarização para higienização de lodo de esgoto e uso no cultivo de Cássia Amarela (*Senna siamea* Lam). 150 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Engenharia Civil, Recife, 2007.

SNIS<sup>1</sup> - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014, SNSA/MCIDADES, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2016.

SNIS<sup>2</sup> - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico de Resíduos Sólidos Urbanos – 2014, SNSA/MCIDADES, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2016.

SPERLING, Marcos Von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Volume 2. 8ª Ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2011.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, R. S.; CORDEIRO NETTO, O. M. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 18, n. 6, p. 1713-1724, nov./dez. 2002.

STAMM, H. R., Método para Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) em projetos de grande porte: estudo de caso de uma usina termelétrica, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

STASTA, P., BORAN, J., Bebar, L., STEHLIK, P., ORAL, J., 2006. Thermal processing of sewage sludge. Appl. Therm. Eng. 26 (13), 1420-1426.

SWERA- Solar and Wind Energy Resource Assessment. United Nations Environment Program. 2017 Disponível em: [https://maps.nrel.gov/swera/?visible=swera\\_dni\\_nasa\\_lo\\_res&opacity=50&extent=-74.01,3.74,-29.84,5.27#/?aL=om7n4n%255Bv%255D%3Dt%26om7n4n%255Bd%255D%3D1&bL=groad&cE=0&lR=om7n4n.8%255Ba%255D%3Df&mC=-18.81271785640776%2C54.228515625&zL=8](https://maps.nrel.gov/swera/?visible=swera_dni_nasa_lo_res&opacity=50&extent=-74.01,3.74,-29.84,5.27#/?aL=om7n4n%255Bv%255D%3Dt%26om7n4n%255Bd%255D%3D1&bL=groad&cE=0&lR=om7n4n.8%255Ba%255D%3Df&mC=-18.81271785640776%2C54.228515625&zL=8) Acesso em 22 de fevereiro de 2017

SZKLO, A. S.; TOLMASQUIM, M. T. **Strategic cogeneration—fresh horizons for the development of cogeneration in Brazil.** Applied Energy, v. 69, n. 4, p. 257-268. [S.l.]. 2001.

TEIXEIRA PINTO, M.A.; Higienização de lodos. In: VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. (Ed.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: DESA-UFMG. 2001. P. 261-297. (Princípios de tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

USEPA – UNITED STATES ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. **Standards for the use or diposal of sewage sludge.** EPA/40 CFR Part 503. Washington, DC, USA, 1997. 25p.

VILELA, F.R.; **Biometanização: estudo da influência do lodo e da serragem no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.** 207p. 2015.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*; v. 1. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 452p. 2014.

WERF- Water Environment Research Foundation, State of the Science on Biogas: Treatment, Co-generation, and Utilization in High Temperature Fuel Cells and Vehicle Fuel, Project Number OWSO10C10a, 2011.

WERLE S.; WILK R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, doi: 10.1016/j.renene.2010.01.019, 2010.

## **Resumo do Currículo Lattes**

Endereço para acessar (<http://lattes.cnpq.br/5923008954541348>)

Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás, na área de resíduos sólidos e ênfase no estudo de gestão do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Goiânia/GO. Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás. Servidora da Prefeitura Municipal de Cezarina com atuação na fiscalização municipal de meio ambiente. Experiência nas áreas de elaboração de projetos de saneamento básico e planejamento ambiental.