

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

VANESSA MENDONÇA DAMASCENO

VIABILIDADE DO USO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
PARA COGERAÇÃO A BIOGÁS: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
MACAÉ-RJ

Macaé, Julho de 2020

VANESSA MENDONÇA DAMASCENO

VIABILIDADE DO USO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
PARA COGERAÇÃO A BIOGÁS: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
MACAÉ-RJ

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Orientadora: M.Sc. Beatriz Rohden Becker
Coorientador: D.Sc. Luan dos Santos

Macaé, Julho de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA BIBLIOTECA DO CAMPUS MACAÉ

333.9539
D155v
2020

Damasceno, Vanessa Mendonça

Viabilidade do uso do lodo de estações de tratamento de esgoto para cogeração a biogás: um estudo de caso no município de Macaé-RJ / Vanessa Mendonça Damasceno. -

-- Macaé: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Laboratório de Meteorologia, 2020.

49 f. : il.

Monografia (Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada)

Orientadora: Beatriz Rohden Becker.

Coorientador: Luan dos Santos.

Bibliografia: f. 46-49

1. Lodo 2. Estação de tratamento de esgoto 3. Biogás I.
Título.

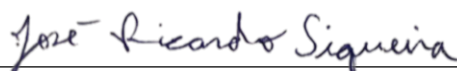
VANESSA MENDONÇA DAMASCENO

VIABILIDADE DO USO DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
PARA COGERAÇÃO A BIOGÁS: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE
MACAÉ-RJ

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Aprovado em 31 de Julho de 2020

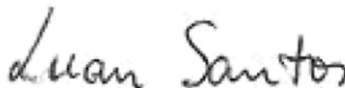
BANCA EXAMINADORA



Prof. José Ricardo Siqueira, D.Sc., UENF



Prof. Matheus Ferreira de Barros, M.Sc., UFRJ



Prof. Luan dos Santos, D.Sc., UFRJ
(Coorientador)



Prof.^a Beatriz Rohden Becker, M.Sc., UFRJ
(Orientadora)

Aos meus pais, irmão,
namorado e mestres,
com carinho dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus a oportunidade de cursar uma pós-graduação e por ter me permitido concluir o curso, por ter me dado saúde durante esta caminhada e força para não desistir desse objetivo. Trabalhar e estudar é sempre um grande desafio, que se torna mais suave quando se conta com a ajuda de amigos, familiares, professores, colegas de trabalho e de grandes inspirações. Foi um caminho longo, cheio de obstáculos e que pude superar dia após dia. Mas eu sempre soube que as maiores conquistas vêm acompanhadas de sacrifícios e acredito que a doação de todo esse tempo foi um investimento e por isso me sinto grata.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense e a Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Aos professores e colaboradores que se doaram para a realização desse curso. Obrigada por compartilharem o tempo e tanto conhecimento, sempre incentivando os alunos a terem pensamento crítico. Foi um privilégio aprender com cada um de vocês.

Agradeço ao meu coorientador Luan dos santos, pela prontidão, dedicação, suporte e por seu amor à profissão. Sempre disposto a ensinar, compartilhar conhecimento e impulsionar o aluno a ser a melhor versão de si mesmo.

Agradeço a minha orientadora Beatriz Rohden Becker, que com sua leveza e pensamento positivo me deu suporte para concluir este trabalho e não desistir. Só tenho que agradecer pelo suporte e contribuição que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À coordenadora Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva pela doação, a busca incansável para proporcionar um curso de qualidade desde a seleção dos alunos, da matrícula até a conclusão do curso.

Aos meus amados pais, seres essenciais em minha vida e que sempre me apoiam em todas as minhas escolhas, sempre incondicionais quando o assunto é o meu desenvolvimento e a crença no meu potencial.

Ao meu namorado Welder Barbosa de Almeida, companheiro da vida que me aguentou nessa fase e me deu a estrutura necessária para seguir com minhas metas.

A toda turma da pós-graduação e em especial à Beatriz Muniz, Priscilla Paes e Rose Braga pelas caronas, pela amizade, pelas trocas de experiências e pelo convívio diário. Por sempre me apoiarem e não me deixar desistir dos meus sonhos.

Muito obrigada!

RESUMO

No Brasil, o setor de saneamento ainda carece de significativos avanços, sobretudo no que diz respeito ao tratamento de esgotos sanitários. Por isso, nos últimos anos, as diretrizes para a universalização dos serviços de saneamento no país têm sido amplamente debatidas. Assim, além da necessidade de ampliação dos índices de tratamento de esgoto, devem-se maximizar, continuamente, a eficiência operacional e a eficácia da remoção da carga poluidora, bem como a viabilidade financeira dos investimentos. Nesse contexto, os processos de tratamento de esgoto geram massa de lodo que, se convertida em biogás, gera energia. O biogás possui considerável poder calorífico, o qual permite o seu aproveitamento como fonte de energia, visando redução dos gastos com energia elétrica e do impacto ambiental, já que contribui para o agravamento do aquecimento global. Nesse aspecto, o presente trabalho teve como objetivo fazer uma análise da viabilidade do uso do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto da cidade de Macaé, Rio de Janeiro para cogeração a biogás, a partir da estimativa de produção de biogás com dados obtidos de três estações de tratamento de esgoto da concessionária que realiza a coleta e o tratamento do esgoto sanitário da cidade. Para a realização dos cálculos foi utilizada a metodologia da avaliação do potencial de geração de biogás, através da estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto (primário bruto mais lodo ativado). Ainda foi possível estimar a quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás, o seu potencial energético e o respectivo lucro associado. Assim, verificou-se que a quantidade de energia total gerada em todas as ETEs analisadas poderia suprir a necessidade de uma população de aproximadamente 300 habitantes, ou seja, o equivalente a um bairro de uma cidade de pequeno porte ou até mesmo de um condomínio residencial. Concluiu-se que ETEs que atendem cidades e/ou bairros com populações menores não apresentam alta viabilidade técnico-econômica. Já ETEs que atendem populações maiores teriam condições de usar o biogás para a geração de calor e eletricidade com taxas internas de retorno mais altas.

Palavras-chave: Lodo. Estação de Tratamento de Esgoto. Biogás.

ABSTRACT

In Brazil, sanitation still lacks significant advances, especially with regard to sewage treatment. For this reason, in recent years, the guidelines for the universalization of sanitation services in the country have been widely discussed. Thus, in addition to the necessity of expanding sewage treatment rates, operational efficiency and the effectiveness of removing the polluting load, as well as the financial viability of investments, must be continuously maximized. In this context, sewage treatment processes generate sludge which, if converted into biogas, generates energy. Biogas has considerable calorific value, which allows it to be used as an energy source, aiming at reducing electricity costs and environmental impact, since it contributes to the worsening of global warming. In this regard, the present work aimed to analyze the feasibility of using the sludge from Sewage Treatment Plants in the city of Macaé, Rio de Janeiro for biogas cogeneration, based on the biogas production estimate with data obtained from three sewage treatment stations of the concessionaire that performs the collection and treatment of the city's sewage. To perform the calculations, the methodology used to assess the potential of biogas generation was used, through the estimation of the amount of biogas produced from mixed sludge. It was also possible to estimate the amount of methane and carbon dioxide gases present in biogas, its energy potential and the respective profit obtained from that potential. Thus, it was found that the amount of total energy generated in all of the sewage treatment plants analyzed could supply the electricity need for a population of approximately 300 inhabitants, that is, the equivalent of a neighborhood in a small city or even a residential condominium. It was concluded that sewage treatment plants that serve cities and / or neighborhoods with smaller populations do not have high technical and economic viability. On the other hand, such plants when serve larger populations would be able to use biogas to generate heat and electricity with higher internal rates of return.

Keywords: Sludge. Sewage treatment station. Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Índices de cobertura de esgotos no Brasil	18
Figura 2. Representação das etapas constituintes do tratamento preliminar.....	21
Figura 3. Fluxograma convencional de tratamento de lodo	24
Figura 4. Composição típica do biogás.....	29
Figura 5. Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano base 2018	30
Figura 6. Valores de potência consumida e produzida obtida através do aproveitamento do biogás	42
Figura 7. Valores custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Níveis de atendimento com água e esgotos dos municípios com prestadores de serviços participantes do SNIS em 2018, segundo macrorregião geográfica e Brasil	19
Quadro 2. Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados	24
Quadro 3. Poder calorífico de alguns gases	29
Quadro 4. Fontes de energias por biomassa utilizadas no Brasil – Fase: Operação.....	31
Quadro 5. Número de ETEs da Alemanha de acordo com porte	31
Quadro 6. Estações de Tratamento de Esgoto e seus respectivos dados de população e de vazão	34
Quadro 7. Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs avaliadas	39
Quadro 8. Estimativa da geração anual de metano e dióxido de carbono presente no biogás gerado em volume e em massa	40
Quadro 9. Cálculo de índices das ETEs avaliadas com a tecnologia de lodo ativado.....	40
Quadro 10. Estimativa da energia bruta produzida anualmente a partir do biogás.....	41
Quadro 11. Valores de potência consumida e produzida e valores de custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BMZ	<i>Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung</i> – Ministério de Cooperação Econômica e Desenvolvimento da Alemanha
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CNS	Conselho Nacional de Saúde
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DWA	<i>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall</i> – Associação Alemã para Água, Esgotos e Resíduos
EBA	<i>European Biogas Association</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de tratamento de esgoto
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> – Agência Alemã de Cooperação Internacional
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PROBIOGÁS	Projeto de Cooperação Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos em Suspensão Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i> – Reator anaeróbio de fluxo ascendente

LISTA DE SÍMBOLOS

Kg	Quilograma
kJ	Quilojoules
kPa	Quilopascal
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Saneamento Básico	17
2.2 Noções sobre os Processos de Tratamento de Esgoto	20
2.2.1 Tratamento da Fase Líquida	22
2.2.2 Tratamento da Fase Sólida	23
2.3 A Produção de Biogás em Sistemas de Tratamento de Esgoto	26
2.4 Biogás na Matriz Energética Brasileira	28
2.5 O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil: PROBIOGÁS	31
3. METODOLOGIA	34
3.1 Dados de Vazão e População Contribuinte	34
3.2 Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto	36
3.3 Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás	36
3.4 Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto	39
4.2 Estimativa da quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás	39
4.3 Estimativa do potencial energético do biogás e seu respectivo lucro	40
5. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados do Atlas Esgoto (ANA, 2017), a situação do atendimento da população brasileira com serviços de esgotamento sanitário ainda pode ser caracterizada como crítica: apenas 43% da população é atendida por sistema coletivo (rede coletora e estação de tratamento de esgotos); 12% é atendida por solução individual (fossa séptica); 18% da população se enquadra na situação em que os esgotos são coletados, mas não são tratados; e 27% é desprovida de atendimento, ou seja, não há coleta nem tratamento de esgotos. O investimento necessário previsto para universalizar os serviços de esgotamento sanitário no Brasil, no horizonte de 2035, foi estimado em R\$ 149,5 bilhões (ANA, 2017). Os investimentos em coleta e tratamento estimados não consideraram os custos associados à construção e manutenção das fossas sépticas, à reposição de redes coletoras antigas ou substituição de sistemas coletores mistos, ao tratamento de esgotos combinados ou ao aproveitamento e/ou processamento de subprodutos, como o lodo e o biogás (ANA, 2017). Já no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), as metas e os recursos financeiros previstos se mostram bastante ousados e estabelecem que 93% dos esgotos coletados sejam tratados em 2033, estimando investimentos para o período 2014-2033 em esgotamento sanitário da ordem de R\$ 181,9 bilhões, incorporando ações em expansão das instalações hidrossanitárias, reposição da coleta e interceptação dos esgotos e reposição no tratamento de esgotos (PLANSAB, 2013).

Contudo, quando observados os marcos regulatórios do saneamento no Brasil, bem como os respectivos investimentos, sabe-se que os últimos dez anos foram os mais representativos para a expansão do saneamento básico, sendo a gestão dos resíduos sólidos urbanos e o tratamento de esgoto as linhas menos prioritárias (MOREIRA, 2017).

No que diz respeito à evolução do índice de coleta de esgoto, ocorreu uma variação positiva de aproximadamente 15% no período de 2004 a 2013. Menos significativa foi o incremento do índice de esgoto tratado, o qual apresentou avanços de apenas 5,3% (ABES, 2015).

Uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) tem como principal finalidade tratar os esgotos domésticos e descartá-los no corpo receptor, garantindo a qualidade do meio ambiente e o bem-estar da população, representando fundamental infraestrutura no âmbito socioambiental e promovendo condições cada vez mais indispensáveis à qualidade de vida humana nas cidades. Por essas razões, a prestação desse serviço precisa ser viável economicamente, para que possa se sustentar em longo prazo.

O tratamento biológico (nível secundário) realizado numa ETE seja por processos aeróbios (com presença de oxigênio) ou anaeróbios (sem presença de oxigênio), resulta em duas saídas: o esgoto tratado, devolvido para os rios ou baías seguindo os padrões de qualidade exigidos e o lodo (primário e secundário), comumente descartado em local ambientalmente adequado (aterro sanitário). O lodo é composto pelos sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgotos, e possui alto teor de matéria orgânica. Devido ao aumento do número de ETEs no Brasil e às exigências dos órgãos ambientais e de saúde pública, o lodo vem ganhando cada vez mais importância.

Em se tratando de processo aeróbio para tratamento de esgotos, o processo de lodos ativados merece destaque, uma vez que é uma tecnologia mundialmente consolidada que evoluiu ao longo do tempo para atender aos diversos objetivos e às eficiências desejadas para o tratamento de esgotos. Esses processos produzem um gás que é conhecido como biogás, e possui essencialmente metano e gás carbônico em sua composição. Dessa forma, é comum encontrar digestores de lodo que produzem biogás em ETEs dotadas de sistemas aeróbios de tratamento de esgoto, sobretudo em plantas de grande porte. Destaca-se que a utilização dos sistemas de lodos ativados é preponderante em ETEs brasileiras com capacidade instalada superior a 100 mil habitantes, representando 44% de todas as alternativas adotadas (CHERNICHARO *et al.*, 2017). Logo, há um potencial significativo de produção de biogás em ETEs brasileiras.

Entretanto, o destino do lodo, em sua maioria, não ocorre de acordo com o previsto pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) por questões relacionadas ao condicionamento e estabilização do lodo gerado, grau de desidratação, formas de transporte, eventual reuso, impactos e riscos ambientais, além de aspectos econômicos (QUEIROZ; PAES; FERNANDES, 2018).

Caso a ETE com sistemas de lodos ativados apresente uma etapa de tratamento da fase sólida, o lodo pode passar por processos de estabilização na própria Estação, que estabiliza a fração biodegradável da matéria presente e a via biológica se dá por meio da digestão aeróbia, com sua utilização limitada à estabilização do excesso do lodo ativado oriundo de ETEs. A estabilização visa atenuar o inconveniente de maus odores no tratamento e manuseio do lodo. A redução dos odores é alcançada através da remoção da matéria orgânica biodegradável componente do lodo e ainda é muito pouco difundida no Brasil (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Dentre as alternativas de destinação e tratamento do lodo pode se incluir a utilização de novas tecnologias para geração do biogás, composto majoritariamente por metano, o qual tem um potencial de aquecimento 28 vezes maior que o CO₂ (IPCC, 2014). Esse subproduto

poluente pode ser visto como uma potencial fonte de energia renovável, caso seja aproveitado energeticamente (ARAGÃO *et al.*, 2018). Assim, em ETEs, o biogás se mostra como um produto estratégico econômico, social e ambientalmente. Ao se promover o biogás de subproduto do tratamento para fonte renovável de energia, a ETE também se promove a um novo patamar em sua prestação de serviço, gerando energia distribuída que pode proporcionar melhorias na gestão de sua energia consumida e nos seus processos de tratamento.

De acordo com Machado (2011), alternativas de fontes renováveis de energia têm sido objeto de pesquisas no mundo inteiro a fim de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e os impactos globais causados pela sua queima e de encontrar soluções sustentáveis para colaborar com a matriz energética. Para a seleção da forma de utilização de energia deve-se levar em conta aspectos econômicos e operacionais e até mesmo o custo local da energia convencional. Diante disso, o biogás pode ser aproveitado de distintas formas, tais como: geração de energia elétrica, geração de energia térmica, cogeração (geração conjunta de energia elétrica e energia térmica), e aproveitamento do gás gerado como combustível para outras unidades na própria estação de tratamento (JORDÃO; PESSOA, 2014).

Considerando o cenário da inserção da eficiência energética na gestão e nos processos nas ETEs, onde o biogás representa um enorme potencial, o projeto de Cooperação Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS) foi a primeira iniciativa em nível nacional a fortalecer o biogás enquanto fonte renovável de energia a partir de todos os tipos de substratos, possibilitando a geração distribuída, o reaproveitamento de subprodutos e a maior eficiência de processos, em especial no setor de saneamento (MOREIRA, 2017).

Diante disso, a importância das questões relacionadas aos benefícios proporcionados ao meio ambiente devido ao aproveitamento do biogás para a geração de energia, o qual seria lançado para a atmosfera, indicam à necessidade de estudos de viabilidade técnica e econômica em cada ETE para o aproveitamento energético do biogás.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma análise da viabilidade do uso do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Macaé-RJ, para cogeração a biogás.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise acerca dos desafios e das perspectivas do aproveitamento do biogás oriundo do tratamento de esgotos no Brasil a partir da comparação com o histórico da Alemanha, especialmente para o caso das ETEs de pequeno porte;
- Estimar a capacidade de produção de biogás proveniente da digestão anaeróbia do lodo gerado em três ETEs da cidade de Macaé-RJ;
- Quantificar o potencial de geração de energia proveniente deste biogás produzido nas ETEs analisadas;
- Levantar os custos necessários para a implantação de um sistema de cogeração a biogás nas ETEs analisadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SANEAMENTO BÁSICO

De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2013), saneamento é o “conjunto de conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas”.

O saneamento básico é um fator essencial para que um país possa ser considerado como um país desenvolvido. O progresso e a difusão de serviços de água tratada, coleta e tratamento dos esgotos proporcionam mais qualidade de vida à população, sobretudo na saúde infantil com redução da mortalidade infantil, redução de outras doenças, melhorias na educação, desenvolvimento do turismo, na geração de empregos, na renda do trabalhador, valorização imobiliária, na despoluição dos rios e preservação dos recursos hídricos.

A história do saneamento remonta a muitos séculos antes da Era Cristã. Com efeito, como o processo de formação das cidades ocorreu na presença de cursos d'água, eram necessárias medidas para a preservação da saúde das pessoas (CNS, 1999).

No Brasil, a história do saneamento também se confunde com o processo de surgimento e formação das cidades. Nos povoados formados na era colonial, o abastecimento de água era feito através de bicas e fontes, de forma rudimentar e precária. A implantação de uma infraestrutura mínima se deu com a chegada da Família Real, notadamente no Rio de Janeiro. Ainda no século XIX verifica-se o crescimento das cidades e elevado fluxo migratório em direção a estas, o que impulsionou o agravamento dos problemas de saneamento básico (CNS, 1999).

Embora se tenha registro da coleta de esgotos desde a Roma Antiga, o seu tratamento faz parte da história recente do homem. De acordo com Andrade Neto (1997), o tratamento dos esgotos no Brasil, até os anos de 1970, se preocupava apenas com a retirada dos sólidos e do material flutuante de matéria orgânica e de patogênicos. A partir de 1970, se passou a dar atenção aos aspectos estéticos, aos interesses ambientais e à remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. E foi somente a partir de 1980 que foram incluídos, dentre os objetivos do tratamento dos esgotos, a remoção de compostos tóxicos, de metais pesados e de compostos recalcitrantes (de difícil biodegradação).

Com efeito, por conta do grande crescimento populacional e industrial vivido na sociedade moderna, aumenta-se a demanda por água e, conseqüentemente, também é ascendente a quantidade de esgoto gerado, podendo este ser definido como todo “líquido que

contém resíduo da atividade humana” seja ele doméstico ou industrial, de acordo com a norma ABNT NBR 7.229/1993 (ABNT, 1993).

Ao longo da evolução histórica, a análise da cobertura dos serviços de saneamento no Brasil revela que houve melhorias perceptíveis no atendimento às populações, sobretudo urbanas. Por outro lado, em que pese às melhorias, os déficits são significativos e refletem o padrão desigual do crescimento econômico vislumbrado pelo país nas últimas décadas.

O lançamento indiscriminado dos esgotos sem tratamento nos corpos d’água pode causar efeitos adversos aos usos das águas. No Brasil, a principal fonte de poluição dos corpos d’água é ainda o lançamento de esgotos domésticos, pois isto ainda é prática comum no país.

Segundo dados do Atlas Esgoto (ANA, 2017), os índices de cobertura em termos de coleta e tratamento de esgotos nas áreas urbanas, em que pese investimentos mais recentes, ainda são insatisfatórios e reflexos de passivo histórico.

A Figura 1 demonstra que as redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira, restando 38,6% que representa milhões de pessoas nas cidades do País que não dispõem de sistema coletivo para afastamento dos esgotos sanitários. Nem todo esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento. A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos representa 42,6% da população urbana total (ANA, 2017).



Figura 1. Índices de cobertura de esgotos no Brasil.

Fonte: ANA (2017).

Já o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, em seu último Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2018, lançado em dezembro de 2019, apresenta os valores médios dos índices de atendimento com água e esgotos e dos índices de tratamento dos esgotos, distribuídos segundo as macrorregiões geográficas e a média do Brasil.

É possível observar que, no Quadro 1, o índice de atendimento total com rede de esgotos, em 2018 no país é igual a 53,2%. Já o índice de atendimento urbano com rede de esgotos chega a 60,9%. Com relação ao indicador médio nacional de tratamento dos esgotos gerados, que representa a parcela dos esgotos gerados que é tratada, observa-se que, em 2018, 46,3% dos esgotos gerados tiveram tratamento. Já o índice médio de tratamento dos esgotos coletados que representa a parcela do volume de esgotos tratado em relação ao volume de esgotos coletado, é igual a 74,5% em 2018 (SNIS, 2019).

Quadro 1. Níveis de atendimento com água e esgotos dos municípios com prestadores de serviços participantes do SNIS em 2018, segundo macrorregião geográfica e Brasil.

Macrorregião	Índice de atendimento com rede (%)				Índice de tratamento dos esgotos (%)	
	Água		Coleta de esgotos		Esgotos gerados	Esgotos coletados
	Total	Urbano	Total	Urbano	Total	Total
	(IN055)	(IN023)	(IN056)	(IN024)	(IN046)	(IN016)
Norte	57,1	69,6	10,5	13,3	21,7	83,4
Nordeste	74,2	88,7	28,0	36,3	36,2	83,6
Sudeste	91,0	95,9	79,2	83,7	50,1	67,5
Sul	90,2	98,6	45,2	51,9	45,4	95,0
Centro-Oeste	89,0	96,0	52,9	58,2	53,9	93,8
Brasil	83,6	92,8	53,2	60,9	46,3	74,5

Fonte: SNIS (2019).

Segundo o Atlas Esgoto (ANA, 2017), a geração de esgotos na área urbana está diretamente associada à população. As principais concentrações populacionais, por sua vez, ocorrem nas capitais das Unidades da Federação e seu entorno, em função da disponibilidade de serviços, infraestrutura, logística e outros elementos que privilegiam o desenvolvimento de todos os tipos de atividades nessas regiões. Portanto, é natural que as capitais e principais aglomerados urbanos do País concentrem a maior quantidade dos esgotos gerados.

Existem leis e resoluções que dispõem sobre as condições, padrões e parâmetros de qualidade, como a Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico com base em princípios fundamentais como abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente. Já a Lei 14.026/2020 (BRASIL, 2020), atualiza o marco legal do saneamento

básico e a relação regulatória entre a ANA e o setor de saneamento, já que a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico passará a editar normas de referência.

Outros exemplos de instrumentos que compõem a legislação federal no que se refere ao meio ambiente, são as resoluções como a Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005); a Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, prescreve que o tratamento dos efluentes deve remover 60% de DBO para o lançamento direto nos corpos receptores (BRASIL, 2011).

Embora existam leis e diretrizes essenciais para a integração da gestão de recursos hídricos com o saneamento, ressalta-se o lançamento de esgotos domésticos nos corpos d'água sem adequado tratamento ou em desconformidade com os atuais padrões legais estabelecidos para lançamento de efluentes, resultando em comprometimento da qualidade da água do corpo receptor e inviabilidade no atendimento aos usos atuais e futuros dos recursos hídricos. Isso ocorre especialmente em áreas urbanizadas (ANA, 2017).

2.2 NOÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os esgotos despejados diretamente nos corpos d'água poluem fontes de captação de água e ainda contribuem para a propagação de doenças entre a população, acarretando também alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, o grau de tratamento submetido ao efluente doméstico pode ser classificado em diferentes níveis, dependendo de suas condições e da eficiência dos processos (JORDÃO; PESSOA, 2014).

Os serviços de saneamento englobam a coleta e o tratamento de esgotos. Deste modo, a coleta e o tratamento de esgoto têm como objetivo a remoção da matéria orgânica solúvel, sólidos em suspensão, organismos patogênicos e contaminantes químicos em efluentes, para que não polua os corpos d'água quando lançados de volta ao meio ambiente (EPA, 2010).

O esgoto doméstico é levado para as estações de tratamento de esgoto (ETE), que realizam uma série de procedimentos para tratá-lo, reduzindo a alta concentração de compostos orgânicos e outros nutrientes e elementos que os tornam prejudiciais ao meio ambiente. Os processos são distribuídos nas etapas de tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário (VON SPERLING *et al.*, 1997).

Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar consiste no conjunto de operações e processos unitários que visam à remoção de sólidos grosseiros, flutuantes e matéria mineral sedimentável.

A Figura 2 apresenta o fluxograma convencional do tratamento preliminar é constituído por grades, desarenadores (caixas de areia) e unidade de medição da vazão. O esgoto é submetido ao processo de retenção dos sólidos grosseiros através do gradeamento por meio das grades. Após, a areia é removida pelas caixas de areia ou desarenadores e em seguida pode ser sujeito à medição de vazão pela calha parshall.



Figura 2. Representação das etapas constituintes do tratamento preliminar.
Fonte: Adaptado de Jordão e Volschan (2009).

Tratamento Primário

Após o tratamento preliminar, o efluente doméstico segue para o tratamento primário, quando presente na linha de tratamento, onde a matéria poluente é separada da água por sedimentação, removendo sólidos inorgânicos e matéria orgânica em suspensão. Os sólidos em suspensão são removidos quase que totalmente e a carga de DBO é removida parcialmente, sendo a carga restante direcionada ao tratamento secundário.

Tratamento Secundário

O tratamento secundário é uma etapa do tratamento de esgoto doméstico realizada após o tratamento preliminar ou primário e tem como objetivo a remoção da matéria orgânica em suspensão não removida no tratamento primário. Consiste em um processo biológico, do tipo lodo ativado ou filtro biológico, onde a matéria orgânica é consumida por microrganismos, nos reatores biológicos. A DBO e sólidos inorgânicos são removidos quase totalmente e dependendo do sistema adotado, a eficiência de remoção é alta.

Tratamento Terciário

O tratamento terciário é uma etapa realizada normalmente, antes do lançamento final no corpo receptor para remoção de outras substâncias contidas nas águas residuais, sendo necessário proceder à desinfecção para a remoção dos organismos patogênicos e demais elementos que não foram removidos nas etapas anteriores.

Em casos para os quais exista uma legislação que determine uma qualidade superior do efluente ou que se deseja a reutilização, usualmente o nível de tratamento terciário é utilizado. A remoção dos contaminantes presentes nos efluentes envolve processos e operações unitárias de natureza física, química e biológica.

Os processos físicos têm como objetivo separar as substâncias em suspensão no esgoto por meio de operações unitárias em que atuam forças físicas promovendo a separação de fases, em que cada uma sofre tratamento específico. Os processos químicos são caracterizados pela utilização de produtos químicos em que atuam transformações químicas que promovem a separação de fases, em que cada uma sofre tratamento específico final ou complementar. E os processos biológicos são os processos que dependem da ação dos microrganismos presentes nos esgotos com a finalidade de remoção da matéria orgânica biodegradável contida nos sólidos dissolvidos e de nutrientes, através de processos biológicos aeróbios (oxidação) ou anaeróbios seguidos de sedimentação final.

De maneira geral, são os seguintes os subprodutos gerados no tratamento dos esgotos, a serem ainda tratadas antes da sua disposição final ou reutilização: subprodutos na forma sólida, semissólida, líquida e gasosa.

2.2.1 Tratamento da Fase Líquida

O tratamento da fase líquida pode ser alcançado por via aeróbia ou anaeróbia. No caso do tratamento anaeróbio, destaca-se o Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), além das lagoas anaeróbias. Em relação ao tratamento aeróbio, além das lagoas de estabilização, são utilizados processos com biomassa suspensa e/ou aderida. As tecnologias que adotam biomassa suspensa são processos de lodo ativado e suas variantes e as que adotam biomassa aderida, são as variações dos filtros que utilizam suporte para aderência dos microrganismos (MARQUES, 2014).

No presente trabalho, será dada ênfase à tecnologia de lodo ativado.

O processo de lodo ativado convencional é um processo biológico onde o esgoto afluente, na presença de oxigênio dissolvido, e o lodo ativado são misturados continuamente

agitados por agitação mecânica e aerados por sistemas de aeração artificial, formando assim flocos denominados lodo ativado ou lodo biológico.

Após essa etapa, por meio de decantadores secundários, o lodo na fase sólida é separado da fase líquida, devido à sedimentação dos sólidos. O lodo ativado volta para o processo de tratamento ou então é separado para algum tratamento específico ou para sua destinação final. Nesse processo, o tempo de permanência do líquido na ETE é baixo. Já os sólidos, permanecem por um tempo mais elevado no sistema devido à recirculação.

Segundo Marques (2014), essa fase do tratamento objetiva a remoção de matéria orgânica biodegradável presente nos esgotos. É considerado tratamento secundário no fluxograma da fase líquida e sua eficiência típica pertence à faixa de 85-95% para DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio); 85-95% tanto para SST (Sólidos em Suspensão Totais).

O sistema de lodo ativado convencional é amplamente utilizado em nível mundial, apresentando vantagens como menor área ocupada, maior flexibilidade de operação e maior eficiência no tratamento. Porém, existem algumas desvantagens, como operação mais delicada, controle laboratorial diário e custo operacional elevado, devido à alta utilização de energia elétrica e alta produção de massa de lodo.

O lodo produzido durante o tratamento de efluentes é o componente de esgoto que possui a maior parcela, sendo 1% a 2% do volume total do esgoto bruto e seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo geralmente entre 20% a 60% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Mesmo sendo rico em minerais e matéria orgânica, o lodo pode conter também organismos patogênicos causadores de doença. Por isso, além de sua importância econômica, a destinação final do lodo é uma operação bastante complexa e descartá-lo diretamente no ambiente pode trazer riscos. Deste modo, o lodo deve receber atenção especial antes de sua destinação final, sendo que o lodo excedente é uma etapa do processo que tem grande ênfase, devendo ser digerido para ser estabilizado, juntamente com o lodo primário que provem do decantador primário do tratamento de esgoto.

2.2.2 Tratamento da Fase Sólida

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades é uma etapa essencial do tratamento de esgotos. Ainda que o lodo possa na maior parte das etapas do seu manuseio ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo líquido sendo tratado (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Segundo Von Sperling (2008), o tratamento do lodo tem por objetivos a separação dos sólidos da água, a estabilização da matéria orgânica e a redução da concentração de organismos patogênicos.

As principais etapas do gerenciamento do lodo e os principais processos utilizados podem ser observados no quadro 2 e a exemplificação do fluxograma de tratamento do lodo frequentemente empregado em nosso meio, na Figura 3.

Quadro 2. Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados.

ADENSAMENTO	ESTABILIZAÇÃO	CONDICIONAMENTO	DESIDRATAÇÃO	HIGIENIZAÇÃO	DISPOSIÇÃO FINAL
<ul style="list-style-type: none"> Adensamento por gravidade Flotação Centrífuga Filtro prensa de esteiras 	<ul style="list-style-type: none"> Digestão anaeróbia Digestão aeróbia Tratamento térmico Estabilização química 	<ul style="list-style-type: none"> Condicionamento químico Condicionamento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> Leitos de secagem Lagoas de lodo Filtro prensa Centrífuga Filtro prensa de esteiras Filtro a vácuo Secagem térmica 	<ul style="list-style-type: none"> Adição de cal (caleação) Tratamento térmico Compostagem Oxidação úmida Outros (radiação gama, solarização etc) 	<ul style="list-style-type: none"> Reciclagem agrícola Recuperação de áreas degradadas Landfarming (disposição no solo) Uso não agrícola (fabric. lajotas, combustível etc) Incineração Oxidação úmida Aterro sanitário

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2001).

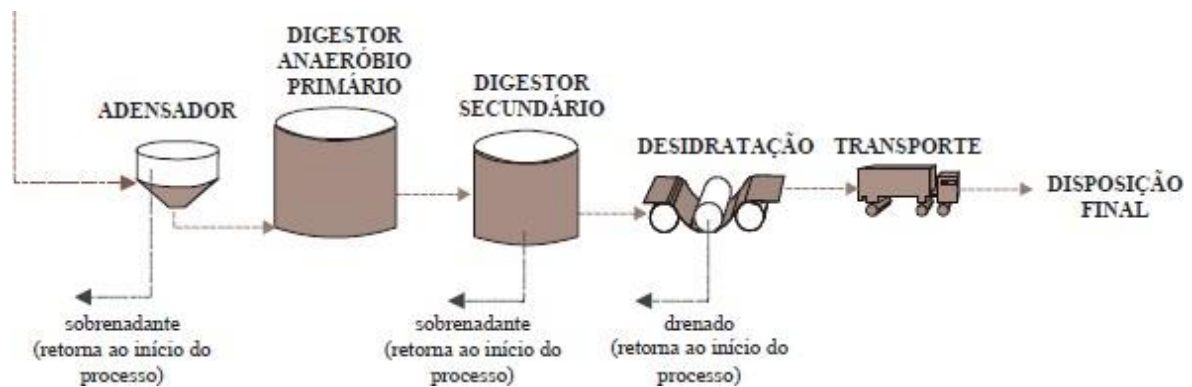


Figura 3. Fluxograma convencional de tratamento de lodo.

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2001).

Segundo Andreoli *et al* (2001), a etapa de adensamento e de desaguamento tem por objetivo a remoção da umidade (redução de volume), enquanto que a estabilização é responsável pela remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis). Já na etapa de condicionamento, ocorre a preparação para a desidratação (principalmente mecânica). Por

fim, a remoção de organismos patogênicos é alcançada na etapa de higienização e então a destinação final dos subprodutos se dá por meio da etapa de disposição final.

A incorporação de cada uma destas etapas no fluxograma do processamento do lodo depende das características do lodo gerado ou, do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida, bem como da etapa de tratamento do lodo subsequente e da disposição final.

De acordo com Andreoli *et al* (2001), as principais etapas do gerenciamento do lodo e seus respectivos objetivos, são:

- Adensamento: é um processo físico de concentração de sólidos no lodo visando reduzir sua umidade e, em decorrência, seu volume, facilitando as etapas subsequentes de tratamento do lodo.
- Estabilização: visa atenuar o inconveniente de maus odores no tratamento e manuseio do lodo. Os processos de estabilização podem ser divididos em: biológica que utiliza bactérias específicas para promover a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica por meio de digestão anaeróbia ou aeróbia; química onde a estabilização é atingida mediante a oxidação química da matéria orgânica por meio de adição de produtos químicos e térmica que é obtida a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados.
- Condicionamento: é um processo de preparação do lodo, através da adição de produtos químicos inorgânicos, orgânicos ou de tratamento térmico para aumentar a sua aptidão ao desaguamento e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo.
- Desidratação ou desaguamento: pode ser realizada por métodos naturais e mecânicos. O objetivo desta fase é remover água e reduzir ainda mais o volume, produzindo lodo com comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. Os principais processos de desidratação são: leitos de secagem, que é uma das técnicas mais antigas na separação sólido-líquido do lodo tendo um custo de implantação reduzido; lagoas de secagem que são utilizadas para adensamento, digestão complementar, desaguamento e até mesmo para disposição final sendo um processo de baixo custo, operacionalmente simples; centrífugas que é um processo forçado pela ação de uma força centrífuga; filtro prensa que são equipamentos que operam em batelada que exige a intervenção de operadores treinados e tem alto grau de confiabilidade e a secagem térmica

que é uma das mais eficientes e flexíveis formas de redução do teor de umidade.

- Higienização: tem o objetivo de garantir um nível de patogenicidade no lodo que, ao ser disposto no solo, não venha a causar riscos à saúde da população. Portanto, a necessidade de se implantar um sistema de higienização complementar de lodos dependerá da alternativa de disposição final que será utilizada.
- Disposição final: engloba diferentes práticas que de forma generalizada podem ser agrupadas como de uso benéfico ou descarte. Assim, de acordo com os processos adotados no tratamento, o lodo pode caracterizar-se como resíduo urbano de disposição final problemática ou como um biossólido, um resíduo de composição predominantemente orgânica e com grande potencial de reciclagem.

Os fluxogramas dos sistemas de tratamento de lodo possibilitam diversas combinações de operações e processos químicos, compondo distintas sequências, em função das características do lodo, dos processos de tratamento de esgoto utilizado e dos métodos de disposição final do lodo empregados (ANDREOLI *et al.*, 2001).

2.3 A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Em ETEs, o biogás pode ser produzido de duas formas: através do tratamento anaeróbio dos esgotos (fase líquida) ou da estabilização anaeróbia do lodo (fase sólida).

Caso a ETE com sistemas de lodos ativados apresente uma etapa de tratamento da fase sólida, uma prática comum de tratamento é sua estabilização anaeróbia visando à conversão parcial da matéria orgânica em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma destruição de microrganismos patogênicos, como a redução dos sólidos secos do lodo.

O biogás é o gás produzido durante o processo de digestão anaeróbia, no tratamento do lodo. Por isso, será dada maior ênfase a esta etapa.

De acordo com Andreoli *et al* (2001), o termo digestão, no tratamento de esgotos, é aplicado ao processo de estabilização da matéria orgânica obtido através da população de bactérias mantida em contato com o lodo em condições que propiciem seu crescimento e reprodução. O processo de digestão anaeróbia é conhecido pela estabilização da matéria orgânica em ambiente livre de oxigênio molecular, sendo um processo bioquímico de múltiplos estágios, capaz de estabilizar diferentes tipos de matéria orgânica.

A eficiência e estabilidade do processo de digestão anaeróbia são variáveis diretamente relacionadas às características do lodo que alimenta o digestor. O lodo bruto que chega ao digestor anaeróbio é uma mistura complexa de materiais com as características determinadas pela área de drenagem atendida e o processo de tratamento adotado na ETE.

Normalmente a presença de nutrientes é suficiente para assegurar o desenvolvimento do processo de digestão anaeróbia, mas a presença de outros fatores pode afetar o desempenho operacional, tais como a temperatura, o pH, a presença de nutrientes e a ausência de materiais tóxicos no afluente. Por isso, as condições climáticas são importantes no que se refere à operação de reatores a temperatura ambiente, já que é um processo sensível a mudanças das condições ambientais (MARQUES, 2014).

Segundo Andreoli *et al* (2001), em uma ETE de lodos ativados convencional, a mistura entre o lodo primário e o excesso de lodo ativado é estabilizada biologicamente em condições anaeróbias e convertida em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O processo é realizado em reatores biológicos fechados, conhecidos como digestores anaeróbios. O digestor é alimentado de forma contínua ou em bateladas e o lodo é mantido no seu interior por determinado tempo. O tempo que o lodo permanece no digestor é conhecido como tempo de detenção.

A produção de biogás no interior do digestor está diretamente associada à alimentação do lodo bruto. Em digestores alimentados em intervalos regulares ao longo do dia, a produção máxima ocorre normalmente duas horas após cada alimentação.

Do ponto de vista da prestação de serviço de tratamento de esgotos, o biogás exerce um papel estratégico por ser um combustível para a promoção mais sustentável desse serviço. Sustentável por abarcar os seguintes aspectos:

- **Econômico:** a utilização energética do biogás proporciona uma redução dos custos operacionais, em especial dos custos com energia elétrica e de gerenciamento do lodo. Dependendo da demanda energética da ETE também pode funcionar como uma fonte adicional de receita, caso a ETE exporte energia. Além disso, a versatilidade dessa fonte combustível permite um gerenciamento da demanda energética para diferentes usos (térmico, elétrico, veicular) e em diferentes horários (ponta e fora ponta).
- **Ambiental:** o biogás é uma fonte renovável de energia que está sendo naturalmente produzida em processos anaeróbios, e pode ser estimulada e otimizada. Por outro lado, caso não seja aproveitada, representa um potencial gás de efeito estufa, com emissão relativa a 28 vezes o gás carbônico. Sendo queimado, ele reduz seu potencial poluidor, mas é uma energia desperdiçada à atmosfera. Seu aproveitamento energético, além de fechar o ciclo do

tratamento de esgotos, representa uma melhoria da qualidade do tratamento, por demandar maior controle de processos e, conseqüentemente, melhor desempenho da ETE.

- Social: para que o processo de captura e uso energético do biogás se materialize, faz-se necessária uma mudança de paradigmas no setor e, conseqüentemente, o desenvolvimento de capacidades. Para o profissional da ETE se engajar na operação de mais um processo, é importante que haja uma valorização desse serviço e do profissional, para que todos na cadeia possam agregar valor. Ou seja, a consolidação do aproveitamento energético, conseqüentemente, elevará a capacidade técnica do profissional. Outro aspecto relevante é a redução do odor nas vizinhanças, um grande problema operacional enfrentado nas estações anaeróbias (NOYOLA *et al.*, 2006; CHERNICHARO *et al.*, 2010). Para o uso energético, o gás necessariamente deverá ser eficientemente coletado e isso implica na vedação e canalização dos gases no processo, garantindo a redução de odores. Mediante esses aspectos estratégicos, o grande desafio que ainda se estabelece é a mudança cultural de como o tratamento de esgotos é visto por todos os atores que são de alguma forma, responsáveis.

2.4 BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio gasoso) da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de bactérias e pode ser proveniente do tratamento do esgoto, bem como do lodo. A produção do biogás em ETEs é uma atividade complexa que pode gerar impactos tanto positivos quanto negativos de acordo com a finalidade que é dada a esse subproduto do tratamento.

De acordo com a norma ABNT NBR 12.209/2011, o biogás é composto principalmente por metano e gás carbônico (ABNT, 2011). A composição do biogás é difícil de ser definida, pois depende do material orgânico utilizado, as condições químicas e físicas e do tipo de tratamento anaeróbio que sofre. A composição do biogás é apresentada na Figura 4.

Usualmente, o biogás é uma mistura gasosa composta principalmente por metano: 65%; gás carbônico: 27% e outros gases.

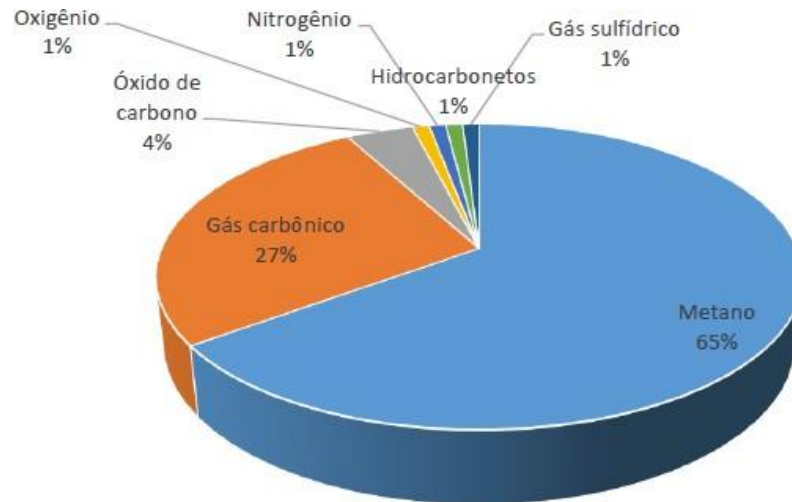


Figura 4. Composição típica do biogás.

Fonte: Adaptado de Jordão e Pessoa (2014).

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado à concentração de metano presente. Para uma concentração entre 55% e 65% o poder calorífico do biogás é de aproximadamente 22.400 kJ/m³. Pode-se dizer então que a qualidade do biogás é dada em função da quantidade de metano: quanto maiores foram as concentrações de contaminantes na composição do biogás, menor será o seu poder calorífico, adaptado de Marques (2014).

Pode-se perceber que o poder calorífico do biogás é bem menor do que alguns gases comerciais. Mas, seu uso ainda pode ser considerado vantajoso por possuir diversas finalidades como geração de energia, tanto elétrica quanto térmica, cogeração e também para aproveitamento como combustível, como para outras unidades da estação de tratamento.

Quadro 3. Poder calorífico de alguns gases.

Gás	Poder calorífico (kJ/m³)
Propano comercial	45.800
Butano comercial	44.600
Gás natural	37.300
Metano	35.800
Gás da digestão (*)	22.400

Fonte: Jordão e Pessoa (2014).

Uma estação de tratamento de lodo ativado pode consumir cerca de 250 a 400 kWh/1000 m³, de acordo com o porte e a eficiência energética implantada na ETE. Assim, existe uma grande preocupação em reduzir os custos com energia (MARQUES, 2014).

O biogás resultante dos digestores anaeróbios de ETEs representa uma fonte de energia alternativa e renovável, sendo uma possibilidade para redução dos custos provenientes da fase de operação e das tarifas, podendo ser utilizado para diversas finalidades como no aproveitamento em veículos automotores das empresas que tratam o esgoto, para produção de energia a ser utilizada na própria estação ou então que pode ser vendida à concessionária de energia do local.

De qualquer forma, o propósito principal do aproveitamento do biogás é reduzir o uso de combustíveis fósseis, e assim, reduzir a quantidade de gases de efeito estufa lançados na atmosfera.

Percebe-se na Figura 5, que de acordo com o Balanço Energético Nacional - BEN (2019), a biomassa é uma fonte que representou, no ano de 2018, 8,5% da oferta interna de energia elétrica brasileira, em relação a todas as fontes energéticas utilizadas no país.

BEN 2019 | Matriz Elétrica Brasileira

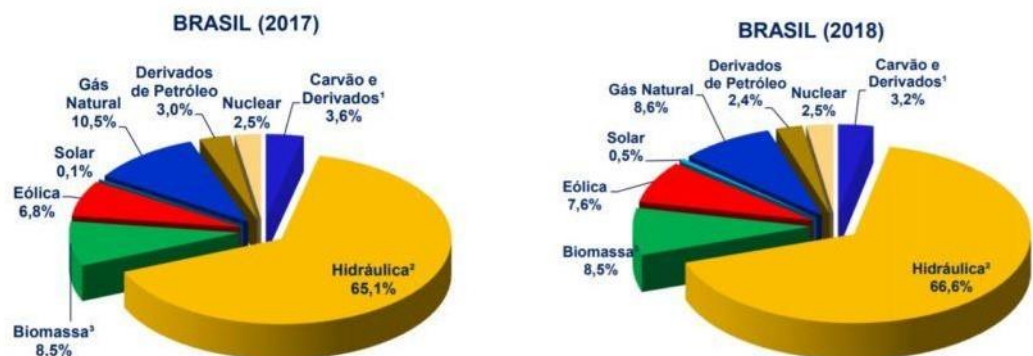


Figura 5. Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil, ano base 2018.

Fonte: BEN (2019).

Desse percentual, 0,92% é originário dos resíduos sólidos urbanos, como pode ser verificado no quadro 4. Entretanto, segundo pesquisas já realizada na literatura, se levada em consideração o aumento do número populacional e a sua concentração nos grandes centros urbanos, pode-se acreditar que o atual aproveitamento do biogás no país encontra-se abaixo do seu potencial.

Quadro 4. Fontes de energias por biomassa utilizadas no Brasil – Fase: Operação.

Origem	Potência Outorgada (MW)	%
Biomassa da Cana de Açúcar	11.247	76,88
Casca de Arroz	45	0,31
Biogás-AGR	1	0,01
Capim Elefante	32	0,22
Floresta	3.161	21,60
Resíduos sólidos urbanos	135	0,92
Resíduos animais	4	0,03
Biocombustíveis líquidos	5	0,03
Total	14.630	100

Fonte: UNICA (2018), dados básicos da ANEEL (2018).

2.5 O PROJETO BRASIL-ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NO BRASIL: PROBIOGÁS

A Alemanha apresenta uma população de cerca de 81,49 milhões de habitantes, sendo dividida em 16 estados federativos e abrangendo uma área de 357.167 m².

Segundos dados de 2016, o país apresenta um índice de 99,1% de abastecimento de água e, nos últimos anos, tem mantido seu consumo de água na ordem de 121 L/hab.dia. O esgoto produzido conta com uma rede de coleta que atende a 97% da população, o restante contando com soluções individuais como pequenas ETEs ou fossas sépticas (DWA, 2016).

Na Alemanha, existem cerca de 10 mil estações de tratamento de esgoto, sendo que 4.150 ETEs com população equivalente menor ou igual a mil habitantes (DWA, 2010). É possível observa-se a partir do quadro 5, a quantidade considerável de ETEs de pequeno porte na Alemanha.

Quadro 5. Número de ETEs da Alemanha de acordo com porte.

Porte (habitante equivalente)	Número (aproximado)
> 100 mil hab	260
50 mil < x ≤ 100 mil	315
10mil < x ≤ 50 mil	1660
5mil < x ≤ 10 mil	865
1mil < x ≤ 5 mil	2385
≤ 1 mil	4150

Fonte: Adaptado de DWA (2016).

Com relação ao aproveitamento energético de biogás, a Alemanha é uma referência mundial, apresentando 10.786 plantas, em um total de 17.240 plantas de biogás na Europa (EBA, 2014), e apresentando o maior mercado de biogás europeu. Todas essas plantas totalizam uma potência instalada de 8.293 MW.

Os principais fatores que favorecem o desenvolvimento do biogás na Europa são diversos, tais como:

- incentivos para o investimento nas instalações;
- preços preferenciais de venda da eletricidade produzida à rede;
- facilidades de ligação à rede elétrica;
- agilidade dos processos da parte dos governos e administrações;
- maior acesso a financiamentos; e,
- incentivos fiscais.

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS) foi iniciado em 2013, coordenado pelo governo brasileiro pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e por parte da Alemanha pela Agência de cooperação alemã para o desenvolvimento sustentável – GIZ. Com o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e para a redução de emissões de gases do efeito estufa, o projeto contou com uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial, com vigência entre os anos de 2013 e 2017.

Para alcançar tais objetivos, o PROBIOGÁS desenvolveu atividades em três linhas: (1) condições-quadro, atuando junto a órgãos governamentais em prol da melhoria das condições regulatórias relacionadas à produção de energia a partir do biogás; (2) cooperação científica, aproximando instituições de ensino e de pesquisa brasileiras entre si e das alemãs; e, (3) cadeia de valor, com o intuito de fomentar a indústria brasileira para produção nacional de tecnologia e de aproximar empresas brasileiras e alemãs para o intercâmbio de conhecimento (PROBIOGÁS, 2015).

Segundo Moreira (2017), com o PROBIOGÁS, o país teve a oportunidade de receber uma injeção de conhecimentos e iniciativas que transformaram significativamente o patamar das discussões técnico-econômicas sobre o aproveitamento energético de biogás em ETEs.

Além disso, o gargalo de conhecimento sobre o tema foi suprido a partir do desenvolvimento de referências técnicas nacionais fundamentais como o Guia de Aproveitamento Energético de Biogás de ETEs, o Estudo de Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do Biogás e o Guia Técnico sobre geração distribuída de energia elétrica por biogás em ETEs. A formação de grupos de trabalho, integração de diferentes atores nas discussões e o desenvolvimento de pesquisa aplicada também foram iniciativas de grande impacto positivo. Antes do projeto, faltava uma massa

crítica e pessoal tecnicamente capacitado no tema, situação que foi transformada com o projeto, em que foram capacitadas 1,8 mil pessoas ao longo de quatro anos.

Ainda de acordo com Moreira (2017), apesar da dificuldade relacionada ao fortalecimento do mercado, em termos de ofertas de serviço, mão de obra qualificada e fornecimento de equipamentos, foram identificadas 10 ETEs com modelos de negócios para uso do gás diferenciados: 3 ETEs que usam o biogás gerado em reatores anaeróbios como energia elétrica via netmetering (projeto piloto), autoconsumo ou apenas para uso térmico para secagem do lodo; 5 ETEs com digestores anaeróbios de lodo, fazendo apenas uso elétrico, uso térmico e elétrico ou purificando o biometano; e uma codigestão de lodo com resíduos orgânicos de grandes geradores, aproveitando o biogás de forma térmica e elétrica. Esses projetos já permitem disseminar bastante conhecimento com as lições aprendidas, que devem ser compartilhadas para facilitar novos projetos.

Ainda se tem como perspectiva os novos projetos em execução, e mais ainda, a capacidade das grandes empresas de saneamento de incorporarem esse tema como prioridade. Acredita-se que as empresas estatais ou as concessões privadas terão melhores condições em impulsionarem resoluções de aproveitamento energético de biogás em ETEs de grande porte, tendo como incentivo principal uma gestão mais eficiente dos sistemas de tratamento de esgotos, alterando os subprodutos em recursos e, conseqüentemente, gerando benefícios econômicos.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, para a realização dos cálculos foi utilizada a metodologia indicada por Marques (2014), para avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto. A fim de avaliar o potencial de geração de biogás, foi feita uma adaptação desta metodologia, mediante a estimativa da quantidade de biogás produzido a partir do lodo misto (primário bruto mais lodo ativado) de três estações de tratamento de esgoto localizadas na cidade de Macaé no estado do Rio de Janeiro, denominadas: ETE Mutum, ETE Centro e ETE Lagomar. Uma quarta ETE (ETE Aeroporto) está prevista para ser construída na cidade, porém não foi considerada neste trabalho. Ainda, a partir dos cálculos, foi possível estimar a quantidade dos gases metano e dióxido de carbono presentes no biogás, o seu potencial energético e o respectivo lucro associado.

3.1 DADOS DE VAZÃO E POPULAÇÃO CONTRIBUINTE

Os dados reais de operação foram utilizados, com o objetivo de apresentar resultados mais consistentes para a estimativa de geração de biogás. Assim, foram levantados os dados de vazão e população das respectivas ETEs (Quadro 6).

Quadro 6. Estações de Tratamento de Esgoto e seus respectivos dados de vazão.

ETE	Vazão (L/s)
Mutum	24,0
Centro	41,0
Lagomar	20,0

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados concedidos pela companhia de saneamento.

Ressalta-se que os dados de vazão do projeto, vazão média atual, área de atendimento, quantitativo da população atendida e tipo de tratamento de cada estação de tratamento de esgoto, utilizados no trabalho para a estimativa de biogás gerado no tratamento do lodo em digestores anaeróbios, foram cedidos pela concessionária local que realiza a coleta e o tratamento do esgoto sanitário.

Em relação ao tipo de tratamento, a ETE Mutum e a ETE Centro apresentam sistema de tratamento terciário, responsável pela remoção de compostos específicos não biodegradáveis e outros compostos que possam ser tóxicos utilizando radiação ultravioleta, garantindo eficiência de até 98% do resultado final do tratamento. Essa etapa é a prática mais

segura para o controle de agentes transmissores de doenças infecciosas, além de ser precedida por uma filtração terciária para garantir a eficiência da desinfecção. Já a ETE Lagomar, apresenta sistema de tratamento secundário, com processo de lodo ativado por aeração prolongada, que pode atingir uma eficiência de 70% de remoção da matéria orgânica.

Para o desenvolvimento do trabalho, ainda, foi considerado, hipoteticamente, que todas as ETEs avaliadas utilizam a tecnologia de lodos ativados e possuem o fluxograma da fase sólida, e este é constituído por digestores anaeróbios.

A produção de esgotos sanitários, assim como o consumo de água, depende também do tipo de esgoto coletado, sistema de coleta, condições climáticas, entre outros fatores. Além disso, a vazão afluyente à ETE está sujeita a variações horárias e diárias. Assim, a população contribuinte foi então estimada em função da vazão unitária de esgoto afluyente a cada ETE avaliada, calculada a partir da Equação 1.

(1)

Sendo:

q = vazão unitária de esgoto [L/hab.dia];

R = coeficiente de retorno [%];

C = consumo médio de água [L/hab.dia].

Segundo Marques (2014), essa estimativa baseia-se no consumo médio de água de uma residência igual a 200 L/hab.dia (LEAL, 2013) e no coeficiente de retorno de água potável à rede coletora de esgoto igual a 0,80, segundo a NBR 9.649/1986 (ABNT, 1986). O resultado dessa equação corrobora com o dado de contribuição diária de esgoto por ocupante permanente numa residência de padrão alto igual a 160 L, apresentado pela NBR 7.229/1993 (ABNT, 1993).

Como o quantitativo da população atendida foi informado considerando as quatro ETEs operando de forma conjunta (cenário futuro), foi preciso estimar a população contribuinte para o sistema de tratamento de esgoto operando atualmente na cidade, composto pelas ETEs Mutum, Centro e Lagomar (Equação 2).

(2)

Sendo:

P = população estimada contribuinte de cada ETE [hab];

Q = vazão média contribuinte afluyente a cada ETE [L/dia];

q = vazão unitária de esgoto [L/hab.dia].

3.2 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DO LODO MISTO

Para a estimativa do potencial de geração de biogás das ETEs estudadas, foi utilizado o índice de geração diária de biogás por habitante igual a 25 L/hab.dia, sugerido por Jordão & Pessoa (2014), pois segundo os mesmos autores, esse índice encontra-se no intervalo entre 25 e 30 L/hab.dia e é adotado para lodo misto (primário + secundário), nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Ainda, ressalta-se que no Brasil, é pratica comum a combinação do lodo primário e do secundário nos digestores anaeróbios (JORDÃO; PESSOA, 2014).

Sendo assim, foi estimada a geração total de biogás proveniente da digestão anaeróbia para cada uma das ETEs, a partir da Equação 3.

(3)

Sendo:

B_{total} = produção total de biogás [m³/dia];

$P_{percapita}$ = produção de biogás per capita para lodo misto [L/hab.dia];

P = população (dados estimados ou encontrados) [hab].

Ainda, pode-se ressaltar que os cálculos realizados no presente trabalho, foram feitos com base em um dado populacional, pois o foco do trabalho é fazer apenas uma estimativa da produção de biogás nas ETEs analisadas. Os cálculos por massa de SVT (sólidos voláteis totais) destruídos são mais confiáveis e, normalmente, utilizados nos balanços energéticos.

3.3 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DOS GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTES NO BIOGÁS

Após a estimativa da produção de biogás, foi possível calcular a produção de gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) presentes no biogás. Esses gases representam um percentual de aproximadamente 65% e 27% na constituição do biogás, respectivamente. Assim, com base nessas concentrações e no que foi sugerido por Marques (2014), foi estimada a produção do CH₄ e CO₂, em kg/ano, através das Equações 4 e 5, respectivamente.

As emissões desses gases foram transformadas em unidade de kg/ano, considerando os gases nas condições normais de temperatura e pressão, através de balanço de massa. As emissões desses gases foram também transformadas em unidade de m³/ano, considerando os valores de densidade absoluta do metano e do dióxido de carbono, gás a 101,325 kPa e 0 °C: 0,7174 kg/m³ e 1,9770 kg/m³, respectivamente.

Foi considerado para os mesmos, que o volume do gás é de 0,02271 m³/mol nas CNTP e que a massa molar do metano é de 0,016 kg/mol e a do dióxido de carbono é de 0,044 kg/mol.

Ainda, pode-se ressaltar que os cálculos consideraram uma condição de produção de biogás contínua. Porém, grandes variações podem ocorrer, em alguma situação indesejável, como quando ocorre o despejo de esgoto industrial junto com o esgoto doméstico e altas contribuições pluviométricas nas galerias de esgoto.

(4)

(5)

Sendo:

$CH_{4volume}$ = produção do gás metano [kg/ano];

$CO_{2volume}$ = produção do gás dióxido de carbono [kg/ano];

B_{total} = produção total de biogás [m³/dia];

MM_{CH_4} = massa molar do metano [kg/mol];

MM_{CO_2} = massa molar do dióxido de carbono [kg/mol];

$Vol_{gás}$ = volume do gás nas condições CNTP [m³/mol].

3.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E SEU RESPECTIVO LUCRO

Para a estimativa da energia produzida anualmente a partir da utilização do biogás proveniente do lodo resultante dos processos anaeróbios (Equação 6), considerou-se o parâmetro $A_{energético}$, igual a 15 kWh/hab.ano, valor sugerido por Jordão & Pessoa (2014).

(6)

Sendo:

E_{prod} = energia produzida a partir do biogás [kWh/ano];

$A_{energético}$ = aproveitamento do poder calorífico do gás da digestão [kWh/hab.ano];

P = população [hab].

Visto que a tarifa média anual no Brasil, para o ano de 2019, é de R\$511,00/MWh, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019), pode-se também estimar o lucro equivalente da energia produzida a partir da produção de biogás, através da Equação 7.

(7)

Sendo:

L_{anual} = lucro equivalente da energia produzida [R\$/ano];

E_{prod} = energia produzida a partir do biogás [kWh/ano].

Ainda, através da metodologia indicada, foi possível calcular alguns índices para cada um dos sistemas de tratamento de lodos ativados convencionais das ETEs em análise, conforme dados de população e de características típicas do sistema. Essas características são: potência *per capita* consumida anualmente (valor médio igual a 22kWh/hab.ano) e custo *per capita* de operação por ano (valor médio igual a R\$15/hab.ano), como exposto anteriormente. Assim, utilizaram-se os valores médios de cada índice para cálculo da potência consumida e do custo de operação.

Com essas informações, realizou-se uma comparação entre a energia consumida pelo sistema de Lodo Ativado Convencional e a energia produzida a partir do biogás proveniente do digestor anaeróbico. Além disso, pôde-se verificar se o sistema de conversão de biogás em energia é autossuficiente ou não, na perspectiva econômica.

Foi estimado o potencial energético e o lucro obtido através da utilização do biogás produzido nos digestores anaeróbios presentes nas ETEs avaliadas, para avaliar o custo-benefício do aproveitamento da geração total de biogás e então realizar um comparativo entre o custo anual de operação e o lucro anual proveniente do biogás.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia antes descrita, de forma a avaliar o potencial de geração do biogás.

4.1 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO A PARTIR DO LODO MISTO

Foi estimada a produção diária de biogás produzido a partir do lodo misto, em cada uma das ETEs avaliadas. Podemos perceber que a geração de biogás é diretamente proporcional ao número de habitantes atendidos pela ETE. Assim, as ETEs que apresentam uma maior vazão a ser tratada, possuem uma maior geração de biogás.

A partir do quadro 7, pode-se observar que a estação do Lagomar, que possui o menor número de habitantes contribuintes, apresentou o menor índice de geração de biogás. Já a estação do Centro, que possui o maior número de habitantes, apresentou o maior índice de geração de biogás.

Quadro 7. Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs avaliadas.

ETE	Vazão (L/s)	População (hab)	Biogás (m ³ /dia)
Mutum	24,0	12.960	324,0
Centro	41,0	22.140	553,5
Lagomar	20,0	10.800	270,0

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DOS GASES METANO E DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTES NO BIOGÁS

Foi estimada a produção de metano e de dióxido de carbono originários das ETEs avaliadas.

Pode-se observar que, a produção volumétrica de metano é substancialmente maior que a do dióxido de carbono, mas a produção em massa de metano é menor que a do dióxido de carbono. Sendo assim, a produção em massa de dióxido de carbono ultrapassa, mesmo que insignificamente, a produção em massa de metano.

De acordo com o Quadro 8, na ETE Mutum, por exemplo, pode-se observar que a produção volumétrica do metano é maior que a do dióxido de carbono. Já a produção em

massa do dióxido de carbono é maior que a produção do metano. Se for analisada também a ETE Lagomar, que possui um número de população atendida bem próximo a do Mutum verifica-se que os resultados foram bem próximos.

Quadro 8. Estimativa da geração anual de metano e dióxido de carbono presente no biogás gerado em volume e em massa.

ETE	m ³ CH ₄ /ano	m ³ CO ₂ /ano	kg CH ₄ /ano	kg CO ₂ /ano
Mutum	75.490,6	31.291,8	54.156,9	61.863,9
Centro	128.963,1	53.456,8	92.518,1	105.684,1
Lagomar	62.908,8	26.076,5	45.130,8	51.553,2

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E SEU RESPECTIVO LUCRO

Foram calculados alguns índices das ETEs avaliadas constituintes da tecnologia de lodos ativados para que fosse possível relacionar o custo de operação. As estações que possuem a tecnologia de lodos ativados possuem elevados gastos com energia elétrica, justificando o alto custo de operação.

No Quadro 9, pode-se observar que a ETE Centro, por exemplo, apresentou o maior índice de energia elétrica consumida e, conseqüentemente, o maior custo de operação. Já a ETE Lagomar apresentou o menor índice de energia elétrica consumida e, conseqüentemente, o menor custo de operação.

Quadro 9. Cálculo de índices das ETEs avaliadas com a tecnologia de lodos ativados.

ETE	População (hab)	Energia elétrica consumida (kWh/ano)	Custo operação (R\$/ano)
Mutum	12.960	285.120	194.400,00
Centro	22.140	487.080	332.100,00
Lagomar	10.800	237.600	162.000,00

Fonte: Elaborado pela autora.

A energia total estimada para as ETEs analisadas, através da produção de biogás, foi superior a 600 mil kWh por ano (Quadro 10). A partir de dados da EPE, referente ao consumo residencial médio no Brasil e ao consumo *per capita*, do ano de 2017, de 157,9 kWh/mês e 2.525 kWh/ano, respectivamente, pode-se constatar que essa quantidade de energia poderia suprir a necessidade de uma população de aproximadamente 300 habitantes,

ou seja, o equivalente a um bairro de uma cidade de pequeno porte ou até mesmo de um condomínio residencial.

Quadro 10. Estimativa da energia bruta produzida anualmente a partir do biogás.

ETE	População (hab)	Energia bruta produzida (kWh/ano)	Lucro (R\$/ano)
Mutum	12.960	194.400	99.338,40
Centro	22.140	332.100	169.703,10
Lagomar	10.800	162.000	82.782,00
TOTAL		688.500	351.823,50

Fonte: Elaborado pela autora.

No Quadro 11, podem-se observar os valores de potência consumida e produzida, e valores de custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.

Quadro 11. Valores de potência consumida e produzida e valores de custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.

ETE	Potência consumida (kWh/ano)	Potência produzida a parti do biogás (kWh/ano)	Custo operação (R\$/ano)	Lucro (R\$/ano)
Mutum	285.120	194.400	194.400,00	99.338,40
Centro	487.080	332.100	332.100,00	169.703,10
Lagomar	237.600	162.000	162.000,00	82.782,00

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 6 é possível observar que em todas as ETEs analisadas, a potência produzida é inferior à potência consumida, correspondendo a aproximadamente 68% e, portanto, não atendendo o total consumo da ETE. No entanto, isso não significa que a energia disponibilizada não possa suprir parte da demanda, podendo atender outras atividades.

Embora a disponibilidade de energia represente uma parcela menor que a potência consumida, ela poderia ser eventualmente usada para atender à fase de aeração biológica ou a recirculação do lodo no próprio digestor, e ainda como energia calorífica (MARQUES, 2014).



Figura 6. Valores de potência consumida e produzida obtida através do aproveitamento do biogás.
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 7, pode-se observar que em todas as ETEs analisadas, o lucro é inferior ao custo de operação.

Em estudos publicados recentemente concluiu-se que ETEs concebidas para atender entre 100.000 e 200.000 habitantes teriam condições de usar o biogás para a geração de calor e eletricidade com taxas internas de retorno entre 8 e 25%. Nestes casos, os elevados gastos com energia elétrica justificariam o alto custo de produção.



Figura 7. Valores custo operacional e lucro obtido através do aproveitamento do biogás.
Fonte: Elaborado pela autora.

Para ETEs com capacidade para atender entre de 200.000 e 450.000 habitantes, essas taxas poderiam alcançar até 80% (VALENTE, 2015). Outros estudos calcularam a viabilidade para ETEs com população equivalente de 100.000 habitantes (PROBIOGAS, 2015; ROSENFELDT *et al.*, 2015). A solução com geração de energia elétrica é de 7 a 10% (dependendo da tecnologia) mais econômica nos custos anualizados do que a solução sem geração de energia (PROBIOGAS, 2015). Portanto, devem-se esclarecer inicialmente todos os custos relacionados ao investimento, operação e manutenção para cada projeto específico, pois a maioria dos equipamentos e alguns produtos específicos são importados. Com isso, o investimento inicial se torna alto, impactando nos custos dos projetos e de tecnologias para geração de energia elétrica. Devem-se considerar também os ganhos obtidos com a venda de energia ou então com a redução de despesa proporcionada, quando está se considerando avaliar a viabilidade econômica dos projetos.

Quando se avalia os instrumentos legais e normativos consolidados na Alemanha, onde o biogás é amplamente utilizado tanto para geração de energia elétrica quanto para a secagem do lodo, observa-se que a lei de resíduos, as exigências do tratamento de esgotos e as normas DWA desenvolvidas direcionaram fortemente as iniciativas de biogás em ETEs. Contudo, quando se observam os marcos legais no Brasil, por meio da PNRS e critérios e parâmetros de qualidade de tratamento, pode-se avaliar os mesmos como suficientemente bons para orientar para novas práticas operacionais, no caso uma melhor gestão do biogás e do lodo de ETEs. Um grande diferencial na Alemanha foi o montante de normativas que deram um grande respaldo técnico para o avanço do tema no setor de saneamento.

A oportunidade de negócio que se identificou majoritariamente na Alemanha foi a necessidade de aquecimento das instalações da ETE, em seguida dos digestores de lodo e em paralelo o aumento do custo de energia elétrica, somado à restrição de envio de matéria orgânica aos aterros. Esses aspectos desenharam uma oportunidade da ETE gerenciar melhor seus processos e se tornar mais eficiente. Para tal, foi necessário o desenvolvimento técnico científico e os projetos começaram a se viabilizar. Vale ressaltar que no caso alemão, a codigestão se mostrou como uma grande oportunidade, por promover uma maior geração de energia para suprir a demanda térmica da ETE.

No país, muitas ETEs recebem contribuição industrial e fazem contratos de recebimento de substratos que potencializem a produção de biogás. No caso do Brasil, a oportunidade de negócio é similar, considerando o problema de gestão de lodo, os custos operacionais com energia elétrica e as restrições legais. As diferenças estão no fato das ETEs brasileiras demandarem menos energia térmica, devido ao clima tropical, e que a codigestão

ainda não se mostrou como uma oportunidade para o setor de tratamento de esgotos domésticos, talvez por sua complexidade operacional.

Sob a ótica da estratégia de gestão, o conceito de ETE indústria e a visão de longo prazo da prestação de serviço são um grande diferencial de condução da prestação de serviços na Alemanha. O Brasil enfrenta muita dificuldade em planejar a longo prazo, em avaliar investimentos e em ver o tratamento de esgotos de forma integrada. Isso pode ser reflexo de uma política fragmentada, com próprios interesses e que pensa dentro do período de um governo.

De acordo com o contexto abordado, pode-se verificar que anteriormente à utilização do método de obtenção do biogás a partir do esgoto doméstico, devem-se considerar os estudos necessários à obtenção de novas tecnologias em conjunto com as normativas e instrumentos de todos os âmbitos. Sendo possível assim, um aproveitamento energético eficaz do biogás das ETEs, o que possibilita um menor custo de energia elétrica e de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

5. CONCLUSÕES

O biogás pode ser considerado uma fonte renovável e economicamente atrativa, pois além de possibilitar a diversificação da matriz energética, proporciona redução do uso dos recursos naturais esgotáveis. Além disso, há vantagem estratégica no uso desse tipo de energia, visto que as ETEs estão localizadas nos grandes centros urbanos e diminuem com isso a necessidade de investimento em infraestrutura para o transporte da energia nos locais de consumo.

Como apresentado, as ETEs que possuem a tecnologia de lodos ativados possuem um alto custo de operação devido aos elevados gastos com energia elétrica. Assim, o aproveitamento energético do biogás é interessante nesses casos, visto que a energia gerada pode ser utilizada na aeração da fase biológica do tratamento. Constatou-se que, em relação ao potencial energético estimado no presente trabalho, para todas as ETEs avaliadas, é possível suprir parte da demanda de energia elétrica da própria estação, mesmo que pequena, ou até mesmo abastecer uma população de aproximadamente 300 habitantes, por consequência da recuperação do biogás.

Assim, ressalta-se que embora a geração de energia elétrica equivalha a uma parte da energia consumida nos processos, ou seja, não torna a ETE autossuficiente em energia, o aproveitamento energético a partir do biogás, ainda mais em ETEs de grande porte, é benéfico por vários motivos: diminuição da energia comprada da concessionária local; possibilidade de utilização do biogás para a geração de energia térmica e o aproveitamento do calor gerado para o aquecimento dos próprios biodigestores (cogeração); possibilidade de venda do excedente de energia, com vistas ao valor da tarifa e o preço de venda à concessionária.

Considerando o atual contexto do setor de saneamento, o maior desafio para o aproveitamento energético de biogás não é técnico ou financeiro, e sim convencer interna e externamente as empresas acerca da viabilidade técnica e econômica de tais projetos devido ao problema de gestão do lodo, os custos operacionais com energia elétrica e restrições legais. Nesse sentido, a sensibilização de todos os envolvidos no processo, desde os agentes governamentais e as instituições financeiras até os gestores e operadores nas prestadoras de serviço, é crucial para que essa alternativa seja nacionalmente fomentada e multiplicada.

Somado a isso, o intercâmbio de informação sobre os projetos em operação e a realização de pesquisas são essenciais para garantir uma maior clareza acerca dos custos e parâmetros de investimento e operação e, conseqüentemente, uma maior qualidade dos projetos e previsibilidade sobre sua viabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. **Impactos da crise sobre o setor de saneamento**, 2015. <http://abes-dn.org.br/pdf/28Cbesa/ConjunturaeSaneamento.pdf> Acesso em: 01/10/2019.
- ANDRADE NETO, Cícero Onofre de. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.p. 19
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final**. 1. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2001.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/> Acesso em: 01/10/2019.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatórios tarifa média**, 2019. Disponível em:
<http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampRegCC.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1>. Acesso em: 10 de julho de 2020.
- ARAGÃO, T. N. M. *et al.* **Aproveitamento Energético de Biogás como Proposta de Melhoria do processo de Tratamento de Efluentes Domésticos: Um Estudo de Caso**. In: XLVIII CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO DA ASSEMAE. Artigo Técnico. Fortaleza – Ceará, 2018. 316 -330
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. 1993.
- BEN. Balanço Energético Nacional – ano base 2018. Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 10 de julho de 2020.
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
- BRASIL. Presidência da República. 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 n o 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. **Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico**. Eng. Sanit. Ambient., v. 15, nº 3, p. 229-236, 2010.

CHERNICHARO, C. A. D. L. *et al.* **Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas**. No prelo, Belo Horizonte, 2017.

CNS – Conferência Nacional de Saneamento – Comissão de Desenvolvimento Urbano e Interior da Câmara Federal – Subcomissão de Saneamento. **Relatório Síntese da Conferência Nacional de Saneamento**: Brasília, 1999.

DWA. (2010). **DWA-Themen**. Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft, Schwerpunkt Abwasser.

DWA. (2016). **DWA-Politikmemorandum**. Positionen zur Umweltpolitik. Hennef: DWA.

EBA. (2014). <http://european-biogas.eu/wpcontent/uploads/2016/01/Graph-1-Biogas-plants.png>. Acesso em 10 de julho de 2020, disponível em European Biogas Association.

EPA, U.S. Environmental Protection Agency. 2010. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf>. Acesso em 10 de julho de 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 – ano base 2017**. Ministério de Minas e Energia. Rio De Janeiro. 2018. Disponível em: http://cbhparanaiba.org.br/uploads/noticias/_noticias_2018/08_11_2018/Anuario-Estatistico-de-Energia-Eletrica-2018vf.xlsx. Acesso em: 10 de julho de 2020.

IPCC. **Climate change 2014**. Synthesis Report, 2014.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. Ed. Rio de Janeiro: ABES. 2014.

JORDÃO, E.P; VOLSCHAN JR., I. **Tratamento de esgotos em empreendimentos habitacionais**. Brasília: CAIXA, 2009. 130 p.

LEAL, F.C.T. **Apostila de Sistemas de Esgotamento Sanitário Urbano e Rural**. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2ª Edição, 2013.

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

MARQUES, L. S. **Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto**. 2014. 63 f. Monografia (Graduação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

MOREIRA, H. C. **Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha**. 2017. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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

PLANSAB. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Brasília: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2013.

PROBIOGAS. **Estudo de viabilidade técnica-econômica do uso do biogás para cogeração em ETEs**. (em preparação) Brasília, 2015

QUEIROZ, C. K.; PAES, J. L.; FERNANDES, P. L. B. G. Caracterização da Produção de Biogás a partir da Biodigestão de Lodo de Esgoto. **In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGA SOLAR. Artigo Técnico**. Gramado – Rio Grande do Sul, 2018. 1 – 10 p.

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE**. 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2018**. Ministério das Cidades. Brasília, 2019. 186p.

UNICA. **União da Indústria de Cana-de-açúcar**. Boletim/Única: A bioeletricidade em números, 2018. <https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Numeros-da-Bioeletricidade-em-2018-UNICA.pdf> Acesso em: 10 de julho de 2020.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil**. 2015. 198 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. Vol. 4. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, n. I. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008.

VON SPERLING, M.; VAN HAANDEL, A.C.; JORDÃO, E.P.; CAMPOS, J.R.; CYBIS, L. F.; AISSE, M. M.; SOBRINHO, P. A. Capítulo 5 do Livro PROSAB/ 1997.