

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ELEILTON GOMES DE OLIVEIRA JUNIOR

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE DUAS CIDADES DO
SERTÃO ALAGOANO A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DE ESGOTO DOMÉSTICO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (ETE)**

DELMIRO GOUVEIA – AL

2019

ELEILTON GOMES DE OLIVEIRA JUNIOR

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE DUAS CIDADES DO
SERTÃO ALAGOANO A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DE ESGOTO DOMÉSTICO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO (ETE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto

DELMIRO GOUVEIA – AL

2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

O48p Oliveira Júnior, Eleilton Gomes de

Potencial de geração de energia de duas cidades do sertão alagoano a partir do biogás proveniente da digestão anaeróbia de esgoto doméstico de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) / Eleilton Gomes de Oliveira Júnior. - 2019.

59 f. : il.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Pedro de Oliveira Netto.
Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2019.

1. Estação de Tratamento de Esgoto – ETE. 2. Tratamento anaeróbio. 3. Energia elétrica. 4. Biogás. 5. Santana do Ipanema – Alagoas. 6. Piranhas – Alagoas. I. Título.

CDU: 662.767.2

Folha de Aprovação

ELEILTON GOMES DE OLIVEIRA JUNIOR

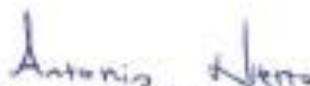
POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE DUAS CIDADES DO SERTÃO
ALAGOANO A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DE ESGOTO DOMÉSTICO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO (ETE)

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
corpo docente do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Alagoas – Campus do
Sertão e aprovado em 08 de agosto de 2019.

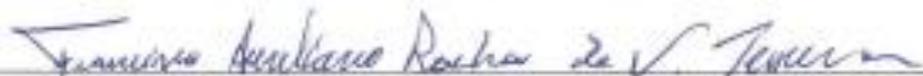


Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto, UFAL – Campus do Sertão
(Orientador)

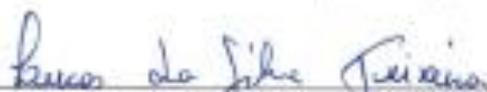
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antonio Pedro de Oliveira Netto, UFAL – Campus do Sertão
(Orientador)



Eng. Francisco Aureliano Rochas de Vasconcelos Teixeira, UFAL – Campus do
Sertão (Avaliador)



Eng. Lucas da Silva Teixeira, Companhia de Saneamento de Alagoas - CASAL
(Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de finalizar esse trabalho. Agradeço ao meu pai Eleilton, a minha mãe Antônia Jucileide e aos meus irmãos Leticia, Vinicius e Francisco Neto que me deram apoio em todas as dificuldades da minha vida. Minha família foi, é e sempre será a minha base.

Agradeço a minha irmã Letícia e ao meu primo Paulo Henrique que moram comigo desde o início do curso e me deram suporte durante esses 5 anos. Agradeço a toda a minha família pela criação e educação que deram, em especial as “Carlos” que me deram incentivo, carinho, motivação, apoio e suporte durante toda a minha vida. “Quem tem uma Carlos tem tudo”.

Agradeço ao meu orientador, professor Antonio Netto por todos os ensinamentos passados tanto pelas disciplinas ministradas por ele quanto pela supervisão do meu estágio, de onde foi retirado o tema desse trabalho. Além da excelente orientação para que esse trabalho fosse realizado.

Agradeço a CASAL pelos dados fornecidos para a elaboração desse trabalho, em especial ao Antônio Ramos que foi meu supervisor de estágio na mesma e um dos que me incentivou na definição do tema desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos da universidade Bruno, Carmelita, Karla Juliana, Jardel, Josilane, Lindayane, Rafael Carvalho, Thauany e a todos com quem tive a oportunidade de interagir ao longo do curso.

Agradeço em especial aos meus amigos de curso e de estudo Eliton, Ericson, Juliano, Leandro, Rafael Alves e Rafael Santana que me acompanham e ajudam desde o segundo período na elaboração de projetos, realização de provas e outras atividades, além do apoio e ajuda, com dicas e correções, na elaboração desse trabalho desde seu início.

“Para conhecermos os amigos é necessário passar pelo sucesso e pela desgraça. No sucesso, verificamos a qualidade e, na desgraça, a qualidade”.

Confúcio

RESUMO

Este trabalho buscou estimar o potencial de geração de energia elétrica proveniente da geração de biogás da digestão anaeróbia de esgoto doméstico da ETE Santana do Ipanema, situada na cidade de Santana do Ipanema-AL, e da ETE Xingó, situada na cidade de Piranhas-AL. A estimativa de biogás foi feita utilizando dados, fornecidos pela Companhia de Saneamento de Alagoas, de concentração de DBO e população atendida para cada ETE, com a utilização de fórmulas teóricas para determinação da vazão mensal de biogás e vazão mensal de metano dos dois sistemas. A geração de energia elétrica útil foi calculada com o uso do programa "Biogás, geração e uso energético – Efluentes 1.0". Com concentração média de DBO igual a 292,84 mgO₂/L e uma vazão calculada de 7,39 L/s se obteve para a ETE Santana do Ipanema uma estimativa de geração de biogás de 17,95 m³/dia, uma estimativa de geração de metano de 328,43 m³/mês e a estimativa da geração de energia útil foi de 931 kWh/mês; já a ETE Xingó com uma vazão calculada igual a 12,59 L/s e a concentração média de DBO igual a 376,67 mgO₂/L foi obtido uma estimativa de geração de biogás de 41,79 m³/dia, uma estimativa de geração de metano de 764,7 m³/mês e a estimativa da geração de energia útil foi de 2.165 kWh/mês. Os dados gerados são um dos indicativos para a possibilidade da elaboração de um projeto de sistema de coleta de biogás e geração de energia elétrica, já que as duas ETES apresentaram satisfatória conversão de geração de energia elétrica por volume de biogás produzido.

Palavras-chave: geração de biogás, geração de energia elétrica, produção de metano, tratamento anaeróbio.

ABSTRACT

This study aimed to estimate the potential of electricity generation from biogas generation from anaerobic digestion of domestic sewage from the Santana do Ipanema STS, located in the city of Santana do Ipanema-AL, and from the Xingo, located in the city of Piranhas-AL. The estimation of biogas was made using data provided by the Alagoas Sanitation Company of BOD concentration and population served for each STS, using theoretical formulas to determine the monthly flow of biogas and methane from the In both systems, the useful electricity generation was calculated using the program "Biogas, generation and energy use - Effluents 1.0". With an average BOD concentration of 292.84 mgO₂/L and a calculated flow rate of 7.39 L/s, an estimated biogas generation of 17.95 m³/day, was obtained for the Santana do Ipanema STS an estimated methane generation of 328.43 m³/month and the estimated useful power generation was 931 kWh/month; already the Xingo STS with a calculated flow rate equal to 12.59 L/s and an average BOD concentration equal to 376.67 mgO₂/L an estimated biogas generation of 41.79 m³/day was obtained. , an estimated methane generation of 764.7 m³/month and an estimated useful energy generation of 2,165 kWh/month. The data generated are indicative of the possibility of installing a system for the collection and generation of energy, such as two STS produced by one generation of electricity per volume of biogas.

Keywords: biogas generation, electric power generation, methane production, anaerobic treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Municípios que coletam e tratam esgoto, por Grandes Regiões- 2008.....	16
Figura 2: Representação esquemática do processo metabólico da digestão anaeróbia.....	20
Figura 3: Valores de pH no início e fim do processo com a inserção de NaHCO_3	24
Figura 4: Comparação entre os tratamentos aplicados e a produção de biogás.....	25
Figura 5: Esquema de um tanque séptico de câmara única.....	26
Figura 6: Esquema de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente.....	27
Figura 7: Representação esquemática do funcionamento de um reator UASB.....	28
Figura 8: Esquema ilustrativo de um reator anaeróbio de manta granular expandida.....	29
Figura 9: Esquema ilustrativo de um reator anaeróbio de circulação interna (IC).....	30
Figura 10: Estimativa de emissões de metano (modelo LandGEM) em aterro sanitário.....	32
Figura 11: Estimativa de emissões de metano (modelo Biogás) em aterro sanitário.....	32
Figura 12: ETE Santana do Ipanema.....	33
Figura 13: Fluxograma da ETE Santana do Ipanema.....	34
Figura 14: ETE Xingó.....	35
Figura 15: Fluxograma da ETE Santana do Ipanema.....	36
Figura 16: Interface do Software.....	39
Figura 17: Dados de entrada a ser escolhido.....	40
Figura 18: Potência elétrica disponível para a ETE Santana do Ipanema.....	48
Figura 19: Potência elétrica disponível para a ETE Xingó.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados médios semanais do teor de CH ₄ , CO ₂ e outros gases, presentes no biogás produzido.	22
Tabela 2: Produção diária de biogás em cinco propriedades rurais.	31
Tabela 3: Faixas típicas do consumo per capita de água.	42
Tabela 4: Valores de DBO e eficiência de remoção de DBO da ETE Santana do Ipanema.	44
Tabela 5: Valores de DBO da ETE Xingó.....	44
Tabela 6: Poder calorífico inferior de combustíveis gasosos.	48
Tabela 7: Energia útil por volume de biogás.	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BSR – Bactérias Sulforredutora

CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

CHC_3OOH – Ácido Acético

CH_4 – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO_2 – Dióxido de Carbono

DAFA – Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EGSB – Reator Anaeróbio de Manta Granular Expandida (*Expanded Granular Sludge Bed Digestão*)

EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FORSU – Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

H_2 – Gás Hidrogênio

HCO_3^- – Bicarbonato

H_2O – Fórmula da Água

HS^- – Bissulfeto

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC – Reator Anaeróbio de Circulação Interna

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

N – Nitrogênio

Na_2CO_3 – Carbonato de Sódio

NaHCO_3 – Bicarbonato de Sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NO_3^- – Nitrato

P – Fósforo

pH – Potencial Hidrogeniônico

RALF – Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado

RCCC – Resíduo de Couro Curtido ao Cromo

SMA – SP – Secretaria de Estado do Meio Ambiente

SO_4^{2-} – Sulfato

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVOS GERAIS	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO	15
3.1.1. Definição de esgoto sanitário	15
3.1.2. Importância do tratamento de esgoto sanitário	15
3.2. DIGESTÃO ANAERÓBIA	17
3.2.1. Fases da digestão anaeróbia	18
3.2.1.1. Hidrólise	18
3.2.1.2. Acidogênese	18
3.2.1.3. Acetogênese	19
3.2.1.4. Metanogênese	19
3.2.1.5. Sulfetogênese	20
3.2.2. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia	21
3.2.2.1. Temperatura	21
3.2.2.2. pH	23
3.2.2.3. Alcalinidade	23
3.2.2.4. Nutrientes e inibidores	24
3.2.2.5. Outros fatores	24
3.3. TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	25
3.3.1. Sistema tanque séptico – filtro anaeróbio	25
3.3.2. Reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)	27
3.3.3. Reator anaeróbio de manta granular expandida (EGSB)	28
3.3.4. Reator anaeróbio de circulação interna (IC)	29
3.3.5. Aterro sanitário	30

3.3.6. Produção de biogás	31
4. METODOLOGIA	33
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETE	33
4.1.1. ETE Santana do Ipanema	33
4.1.2. ETE Xingó	34
4.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	36
4.2.1. Estimativa da vazão afluente a ETE	36
4.2.2. Estimativa da geração de biogás	36
4.3. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO	37
4.4. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO METANO	38
4.4.1. Software Biogás – Efluente 1.0	38
4.4.2. Estimativa da potência disponível e potência máxima possível	40
4.4.3. Estimativa da energia disponível	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	42
5.1.1. Estimativa da vazão afluente a ETE	42
5.1.1.1. ETE Santana do Ipanema	42
5.1.1.2. ETE Xingó	43
5.1.2. Estimativa da geração de biogás	43
5.2. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO	47
5.3. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO METANO	47
5.3.1. ETE Santana do Ipanema	47
5.3.2. ETE Xingó	49
5.4. GERAÇÃO DE ENERGIA POR VOLUME DE BIOGÁS	50
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

Devido a diversas crises energéticas ao longo do tempo, a busca por novas fontes energéticas se tornou necessária, principalmente, para a geração de energia elétrica. As fontes renováveis se apresentaram como uma alternativa com grande crescimento nos últimos anos, principalmente na Europa, por causa dos problemas de poluição e degradação do meio ambiente, que as fontes não-renováveis causam.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE,2019), o Brasil possui a matriz elétrica mais renovável do mundo, com 82% da energia elétrica sendo gerado por fontes renováveis. Porém, a matriz elétrica brasileira é muito dependente da fonte hidráulica representando, segundo a EPE, 65,2% da matriz elétrica brasileira.

Esse desequilíbrio na matriz elétrica, que sobrecarrega a matriz hidráulica, pode ocasionar crises elétricas, como a crise de 2001, um dos motivos dessa crise foi devido a “estiagem, a qual provocara um esvaziamento dos reservatórios das hidrelétricas, uma vez que a maior parte da geração de energia elétrica no Brasil é de origem hidráulica” (SROUR 2005, p. 51).

De acordo com Wanderley (2017), o Nordeste tem uma situação mais crítica em relação ao restante do país quando se fala em crise hídrica devido à longos períodos de seca que a região está submetida, fazendo com que os reservatórios das usinas hidrelétricas trabalhem com o volume crítico, ocasionando apagões e encarecendo a conta de luz para o consumidor.

Portanto, há a necessidade de se investir em outras fontes renováveis para equilibrar a matriz energética brasileira, como a biomassa, em especial na geração de biogás proveniente do tratamento anaeróbio de efluentes domésticos e resíduos orgânicos. Segundo Sant’Anna Jr (2013), a experiência chinesa e indiana com a digestão anaeróbia de resíduos agrícolas, foi um dos marcos para a difusão desse tipo de tratamento, assegurando melhoria das condições sanitárias e a geração do biogás. Sendo o biogás um insumo energético de grande utilidade para a população do meio rural.

Além desses benefícios de acordo com Machado (2011), uso da biomassa como fonte renovável permite a redução da emissão de gases do efeito estufa e a diversificação da matriz energética nacional.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), somente 55% dos municípios brasileiros possuíam redes coletoras de esgoto, e somente 52% das cidades com redes coletoras, o esgoto coletado é tratado. Portanto, a geração de energia elétrica por meio do

tratamento de efluentes domésticos pode ser um incentivo aos governos para o aumento do investimento no setor de saneamento básico.

Diante disso, o presente trabalho tem como proposta analisar o potencial energético da geração de energia elétrica por meio do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico oriundos das cidades de Santana do Ipanema (ETE Santana do Ipanema) e Piranhas (ETE Xingó), localizadas no sertão alagoano.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Analisar o potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás proveniente da digestão anaeróbia do esgoto das Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Santana do Ipanema e ETE Xingó.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a ETE Santana do Ipanema e ETE Xingó, por meio de dados da localização, população atendida e tipos de tratamentos realizados;
- Estimar a geração de biogás proveniente do sistema de cada ETE;
- Estimar, por meio do uso de programa específico, a geração de energia elétrica, de cada ETE, a partir da estimativa de geração de biogás;
- Estimar a quantidade de energia elétrica gerado por volume de biogás de cada ETE.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

3.1.1. Definição de esgoto sanitário

Segundo a norma de Estudo e Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário, NBR 9648 (ABNT, 1986), esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. De acordo com a mesma norma as parcelas do esgoto sanitário têm as seguintes definições:

- **esgoto doméstico:** despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas;
- **esgoto industrial:** despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos;
- **água de infiltração:** toda água, proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações;
- **contribuição pluvial parasitária:** parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário.

3.1.2. Importância do tratamento de esgoto sanitário

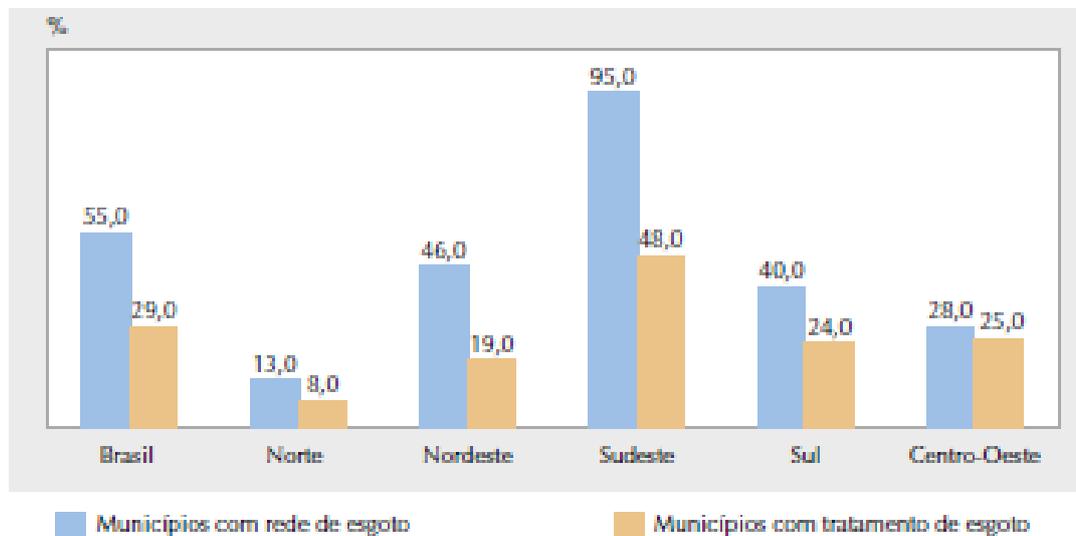
“A principal fonte de matéria orgânica nas águas naturais nos dias de hoje é, na grande maioria das vezes, a descarga de esgotos sanitários” (PIVELLI & KATO, 2006, p.223). A falta de tratamento do esgoto gerado acarreta na poluição de rios, córregos e lagos e, conseqüente, na proliferação de várias doenças, portanto se faz necessário a implantação de um sistema de saneamento básico adequado. Além de evitar a proliferação de doenças, o tratamento do esgoto tem como produto final, na maioria das vezes, água de reuso que pode ser usada em diversas atividades, como na irrigação de jardins, lavagem de calçadas, entre outras, minimizando o desperdício de água.

Além de prever e controlar doenças, segundo Oliveira Netto (2007) as atividades de saneamento também propiciam uma melhoria na qualidade de vida das pessoas, uma melhoria na produtividade do indivíduo e, conseqüentemente, facilita o desenvolvimento das atividades econômicas.

Porém, apesar de todos os benefícios que o tratamento do esgoto gera, essa é uma realidade que não existe para boa parte da população brasileira. De acordo com o IBGE (2008) dos 5.564 municípios do país, apenas 3.069, aproximadamente 55%, possuíam redes coletoras de esgoto, sendo que somente 1.587, aproximadamente 52% das cidades com redes coletoras,

o esgoto coletado é tratado. Ainda segundo o IBGE (2008) quando se trata da oferta de saneamento básico as desigualdades regionais são bem acentuadas, como mostra a Figura 1:

Figura 1: Municípios que coletam e tratam esgoto, por Grandes Regiões- 2008.



Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

O tratamento de esgoto é uma atividade pouco difundida no país, onde apenas 29% dos municípios possuem tratamento de esgoto (IBGE, 2008). Como consequência os rios e mares são contaminados com os dejetos provenientes do esgoto não tratado prejudicando o abastecimento de água da população e a balneabilidade.

“Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água, e apenas 0,1% de sólidos” (FUNASA, 2004, p. 155). De acordo com a FUNASA (2015) os problemas com poluição das águas ocorrem devido a esses 0,1% de sólidos, sendo necessário o tratamento dos esgotos.

O tratamento é feito na estação de tratamento de esgoto (ETE), segundo Sperling (2005) o tratamento de esgoto é geralmente dividido em: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário. Ainda segundo Sperling (2005,) o tratamento terciário, raramente utilizado em países subdesenvolvidos.

No tratamento preliminar os sólidos grosseiros são retidos, no tratamento primário são removidos os sólidos sedimentáveis e por fim no tratamento secundário os sólidos dissolvidos e em suspensão são absorvidos pela biomassa e sendo removidos na sedimentação. Quando há despejos de dejetos industriais se faz necessário um tratamento complementar ou terciário. (NUVOLARI *apud* MEDEIROS & PAEZ, 2015).

O tratamento secundário pode ser realizado por meio de dois processos: físico-químico e biológico. Em que o tratamento biológico pode ser anaeróbio, aeróbio ou uma combinação dos dois.

Então, torna-se lógico, considerar a melhor tecnologia disponível para tratamento dos efluentes, que reduza o investimento inicial e os custos de operação, visando devolver para a natureza os insumos utilizados, em qualidade pelo menos equivalente, sem transferir nenhuma parte do problema para outro local (OLIVEIRA NETTO, 2007).

Portanto antes de escolher o tipo de tratamento deve se definir quais parâmetros devem ser reduzidos ou eliminados e qual a finalidade dos produtos resultantes desse tratamento. Além de avaliar as questões financeira e ambiental.

3.2.DIGESTÃO ANAERÓBIA

“A biodigestão anaeróbia é um processo fermentativo microbiano de flora mista onde a matéria orgânica, na ausência de oxigênio livre, é convertida a gases compostos predominantemente de metano e dióxido de carbono” (MASSEY & POHLAND *apud* OLIVEIRA NETTO, 2007, p. 9). “Sem a presença de oxigênio, são utilizados aceptores de elétrons inorgânicos, como NO_3^- (redução de nitratos), SO_4^- (redução de sulfatos), ou CO_2 (formação de metano)” (MEDEIROS & PAEZ, 2003, p. 15). Porém, não haverá formação de metano em ambientes que possuem oxigênio, nitratos e sulfatos como aceptores de elétrons.

O metano (CH_4) é um gás produzido em diversos ambientes naturais, como pântanos, lagos e mares, resíduos vegetais em deterioração, órgãos digestivos dos animais rudimentares, inclusive o próprio homem (MEDEIROS & PAEZ, 2003). O metano é produzido também em locais que foram construídos pelo homem, como lixões, aterros sanitários e esgotos.

A digestão anaeróbia surgiu originalmente segundo (OLIVEIRA NETTO, 2007) para proporcionar uma diminuição da poluição causados pelo despejo de efluentes na natureza, porém durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial e a crise do petróleo dos anos 70 a digestão anaeróbia teve objetivo de produção de energia limpa.

Atualmente o principal objetivo da digestão anaeróbia é a preservação do meio ambiente, porém a produção de energia não deve ser descartada, pois de acordo com Costa (*apud* PEREIRA et al, 2015),

a conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos.

A digestão anaeróbia quando comparada com processos aeróbios segundo Sant’Anna Jr (2013, p. 215) apresenta várias vantagens como:

produz menor quantidade de biomassa; dispensa o uso de aeração e, em decorrência, apresenta menor consumo de energia; consome menor quantidade de nutrientes (N e P) em função da menor produção de biomassa; gera um gás combustível que, em muitos casos, pode representar um insumo energético relevante; a biomassa pode ser estocada por longos períodos sem perda significativa de sua atividade.

Entretanto, ainda de acordo com Sant'Anna Jr (2013, p. 215) a digestão anaeróbia apresenta as seguintes desvantagens:

não apresenta eficiência muito alta de remoção de DQO, exigindo muitas vezes tratamento complementar aeróbio ou físico-químico; é sensível a poluentes tóxicos e inibidores; pode gerar odores se o projeto não for adequado; o efluente tratado é praticamente desprovido de oxigênio dissolvido e pode apresentar cor e/ou odor; a partida do reator ou a recuperação de situação instável de funcionamento pode exigir longos tempos de operação.

3.2.1. Fases da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia, diferente do processo aeróbio, tem grau de complexidade, sendo realizada por reações químicas sequenciais, com vários grupos microbianos em cada fase específica da digestão anaeróbia. Essas reações são: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese.

3.2.1.1.Hidrólise

Na hidrólise os compostos orgânicos complexos são transformados pelas bactérias fermentativas em compostos mais simples, de menor peso molecular. Na primeira etapa do processo de digestão anaeróbia, hidrólise, segundo Sant'Anna Jr (2013, p. 216) “substâncias de alta massa molar (proteínas, polissacarídeos, lipídios, ácidos nucleicos) e material orgânico particulado são transformados em substâncias de menor massa molar pela ação de enzimas hidrolíticas excretadas por diversas espécies microbianas”

As proteínas são quebradas e formam aminoácidos, os carboidratos formam açúcares solúveis e, por fim, os lipídios são convertidos para ácidos graxos voláteis de cadeia longa.

3.2.1.2.Acidogênese

Logo após a hidrólise inicia-se o processo de acidogênese, “as substâncias resultantes da etapa de hidrólise são fermentadas gerando ácidos carboxílicos de cadeia curta, os chamados ácidos voláteis” (SANT'ANNA JR, 2013, p.216). Os microrganismos acidogênicos absorvem os compostos resultantes do processo de hidrólise e os excretam como ácidos graxos de cadeia curta, como o formiato, acetato, propionato, entre outros.

3.2.1.3. Acetogênese

Os ácidos produzidos na acidogênese são convertidos pelas bactérias sintróficas acetogênicas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, substratos importantes para a formação do gás metano produzido na última reação, metanogênese. “Nesta etapa os ácidos de maior cadeia são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono” (SANT’ANNA JR, 2013, p.216).

3.2.1.4. Metanogênese

Nessa etapa as arqueas metanogênicas convertem os compostos orgânicos em biogás. A obtenção do metano (CH₄) pode ser obtido por dois processos: a descarboxilação do acetato e/ou da redução do dióxido de carbono (CO₂) com o hidrogênio (H₂). Para Vilela (2015, p.24):

as arqueas envolvidas nesse processo são divididas em dois grupos: as acetoclásticas, que produzem o metano a partir do ácido acético e de outros compostos, contendo um átomo de carbono; e as hidrogenotróficas, que metabolizam o hidrogênio e o dióxido de carbono, gerando gás metano. (VILELA, 2015, p. 24).

As reações dos dois processos são apresentadas pela Equação 1 e Equação 2, respectivamente:

- Metanogênese acetoclástica



- Metanogênese hidrogenotrófica

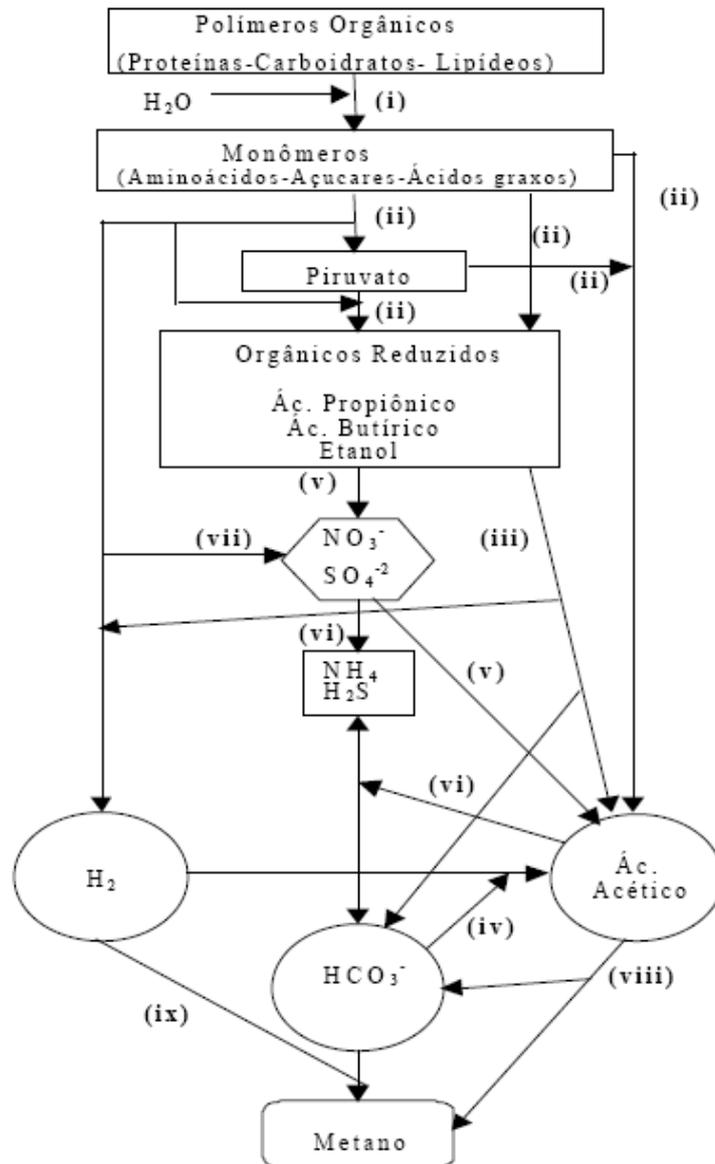


Para Nuvolari (*apud* MEDEIROS & PAEZ, 2015) essas duas bactérias metanogênicas são importantes no processo de digestão anaeróbia, por consumirem o hidrogênio produzido nas fases anteriores, atuando na manutenção do pH numa faixa aceitável para a sobrevivência das mesmas e, conseqüentemente, a continuação da produção de CH₄.

Para Sant’Anna Jr (2013) a metanogênese é uma etapa crucial pois além de produzir biogás, é nessa fase que ocorre, efetivamente, a mineralização dos poluentes (compostos de carbono).

Essas quatro etapas de reações do processo anaeróbio são ilustradas na Figura 2:

Figura 2: Representação esquemática do processo metabólico da digestão anaeróbia.



Fonte: HARPER & POHLAND1 *apud* BORGES, 2003.

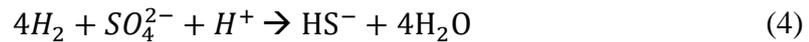
3.2.1.5. Sulfetogênese

“Fase na qual o sulfato e outros compostos à base de enxofre são reduzidos a sulfeto pela ação das bactérias redutoras de sulfato” (VILELA, 2015, p. 25). Para Sant’Anna Jr (2013), muitos efluentes industriais apresentam altas concentrações de carga orgânica e de sulfato, nos reatores anaeróbios haverá competição das bactérias sulforetadoras (BSRs) com as arqueas metanogênicas e bactérias homoacetogênicas, pois as BSRs podem utilizar acetato e hidrogênio para redução do sulfato. Como mostra a Equação 3 e Equação 4:

- Redução do sulfato via acetato



- Redução do sulfato via hidrogênio



Essa competição pode ser um processo indesejável, pois a matéria orgânica deixa de ser transformada em metano e passa a ser transformada em ácido sulfídrico, que além de ser corrosivo apresenta odor muito desagradável.

Porém, a presença de sulfetos pode ser importante para a estabilização de reatores com metais pesados provenientes de efluentes industriais, que são tóxicos para as bactérias metanogênicas. “A remoção de sulfato industriais por BSRs é um processo já desenvolvido e comercializado” (SANT’ANNA JR, 2013, p. 261), segundo Scheeren et al (1992) e Janssen et al (2001) (*apud* SANT’ANNA JR, 2013, p. 261), “a precipitação de metais na forma de sulfeto e sua consequente remoção da fase aquosa também é um processo estabelecido em escala industrial”.

3.2.2. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

Vários são os fatores que influenciam o desempenho da digestão anaeróbia de águas residuais. Dentre os fatores ambientais se destacam a temperatura, o pH, a alcalinidade, a presença de nutrientes e inibidores.

3.2.2.1. Temperatura

A temperatura é um dos fatores ambientais mais importantes na digestão anaeróbia, uma vez que afeta os processos biológicos de diferentes maneiras. Dentre os principais efeitos da temperatura incluem-se as alterações na velocidade do metabolismo das bactérias, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos, principalmente de lipídios.

“As faixas operacionais mais apropriadas para operação da digestão anaeróbia são: a mesofílica (20 a 40 °C) com ótimo a 35 °C e a termofílica (50 a 65 °C) com ótimo a 65 °C.” (SANT’ANNA JR, 2013, p. 251). Segundo Sant’Anna Jr (2013) a digestão termofílica apresenta um melhor desempenho, principalmente quando o filtro é operado sobre condições estressantes com maiores cargas orgânicas e pequenos tempos de retenção hidráulica, pois na condição termofílica as bactérias metanogênicas crescem de forma mais acelerada e além disso alguns substratos são mais solúveis em temperaturas mais elevadas.

De acordo com o trabalho de Tietz et al (2014), apesar de os biodigestores não terem atingidos temperaturas ideais (30 a 35 °C), as temperaturas dos mesmos permanecerem na

condição mesolítica e, conseqüentemente, a produção de metano (CH₄), gás carbônico (CO₂) e outros gases se mantiveram dentro do esperado pela literatura, como ilustrado na Tabela 1:

Tabela 1: Dados médios semanais do teor de CH₄, CO₂ e outros gases, presentes no biogás produzido.

SEMANA	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	OUTROS GASES (%)
1	59,99	38,18	0,83
2	59,44	39,76	0,80
3	60,80	38,40	0,80
4	62,48	36,68	0,84
5	60,48	38,71	0,81
6	59,52	39,69	0,79
7	58,73	40,47	0,79
8	59,68	39,51	0,81
9	59,06	40,16	0,79
10	58,40	40,80	0,80
11	59,06	40,16	0,79

Fonte: TIETZ et al, 2014.

As bactérias anaeróbias conseguem absorver pequenas variações de temperatura, desde que não sejam expostas a esses choques térmicos por muito tempo, como observado no trabalho de Van Lier et al (*apud* SANT'ANNA JR, 2013, p. 252) verificou “que choques de temperatura de 55, 61 e 65 °C, aplicados por períodos de 5, 7 e 24 h, respectivamente, provocaram queda significativa da atividade metanogênica do lodo de um reator que operava a 39 °C”.

Segundo Sant'Anna Jr (2013), a digestão anaeróbia pode ocorrer para temperaturas inferiores a 20 °C, essa fase é chamada de psicrófila. Porém de acordo com Henn et al (2004) a maioria dos autores concordam que o sistema de digestão anaeróbia funciona em temperaturas acima de 10 °C. De acordo com Fulford (*apud* CASTRO & CORTEZ, 1998, p.100) “temperaturas inferiores a 10 °C inibem a atividade microbiana e mudanças súbitas de 5 °C em um dia podem interromper a atividade bactérias metanogênicas, resultando na formação de ácidos voláteis não digeridos”.

3.2.2.2.pH

O pH é um parâmetro que indica acidez do meio, sendo um dos mais importantes parâmetros a serem controlados na digestão anaeróbia, a fim de manter o equilíbrio do sistema e a estabilidade do digestor. Portanto “o controle do Ph nos processos anaeróbios deve ser feito de modo estrito, pois ele é afetado pela produção de ácidos orgânicos e pelas relações de equilíbrio do CO₂.” (SANT’ANNA JR, 2013, p. 252).

Dentre os grupos de microrganismos que fazem parte das fases da digestão anaeróbia, os metanogênicos são os mais sensíveis às variações do pH tendo segundo Sant’Anna Jr (2013, p. 252) “atividade numa faixa de pH estreita, de 6,3 a 7,8”. “Alterações brusca no pH inibem/afetam a atividade das bactérias metanogênicas, a atividade enzimática e as concentrações de toxicidade de vários compostos (BORGES, 2003, p. 12).

Segundo o experimento com reatores anaeróbios de Vilela (2015), devido a utilização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) como um dos substratos a serem tratados, que de acordo com Rodrigues (2005), no início do processo os componentes da FORSU são convertidos rapidamente em ácidos orgânicos voláteis aumentando a acidez do meio, por causa disso todos os reatores apresentaram inicialmente um meio ácido o que ocasionou a inibição do processo metanogênico e, conseqüentemente, não houve a produção do biogás.

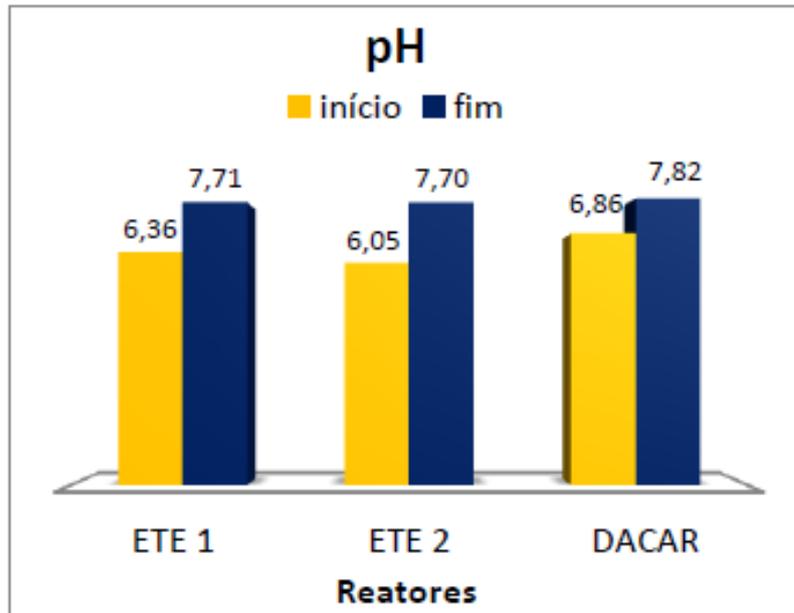
3.2.2.3.Alcalinidade

A alcalinidade é uma forma de medir a capacidade de forma representativa de se neutralizar um meio ácido. “É considerado uma das mais importantes variáveis para o controle e a manutenção da operação dos reatores anaeróbios. ” (SANT’ANNA JR, 2013, p. 253). Ainda de acordo com o autor, é um parâmetro importante de controle operacional de reatores anaeróbios, devido a relação entre alcalinidade, o pH e a pressão parcial do gás carbônico.

Como os organismos metanogênicos são extremamente sensíveis a alterações do pH, principalmente em meios ácidos, faz-se necessário a inserção de algum material alcalinizante, como bicarbonato de sódio (NaHCO₃), carbonato de sódio (Na₂CO₃) e soda cáustica (NaOH), são ótimos neutralizadores de meios ácidos.

No experimento de Vilela (2015), ela observou que todos os reatores tiveram um meio com pH ácido no início, porém com a inserção de um alcalinizante (NaHCO₃) no início do processo resultou na elevação do pH para valores acima de 7, níveis ideais para os organismos metanogênicos. Esses resultados estão ilustrados na Figura 3:

Figura 3: Valores de pH no início e fim do processo com a inserção de NaHCO_3 .



Fonte: VILELA, 2015.

3.2.2.4. Nutrientes e inibidores

Apesar de no processo anaeróbio o consumo de nutrientes ser menor que em processos aeróbios, é importante manter uma relação entre os teores de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Uma das relações mais comuns é $\text{DQO/N/P} = 250/5/1$ (SANT'ANNA JR, 2013). Ainda de acordo com o autor a utilização de outros nutrientes é relevante, principalmente os metais traços, porém alguns metais a partir de certa concentração podem ser tóxicos para os metanogênicos.

De acordo com Silva et al (2016), na digestão anaeróbia combinada de resíduos de arroz com o lodo de uma ETE universitária observaram que a produção de biogás foi maior que na digestão isolada do lodo, isso se deu devido aos microrganismos do lodo somados ao alto índice de carbono no arroz. Ainda de acordo com os mesmos autores, nesse mesmo trabalho quando o lodo foi adicionado juntamente com resíduo de couro curtido ao cromo (RCCC) houve uma redução da produção de biogás quando comparada com a digestão somente do lodo, isso aconteceu devido a toxicidade do cromo do RCCC e a estabilidade desses resíduos por causa da reação do cromo com a proteína (curtimento).

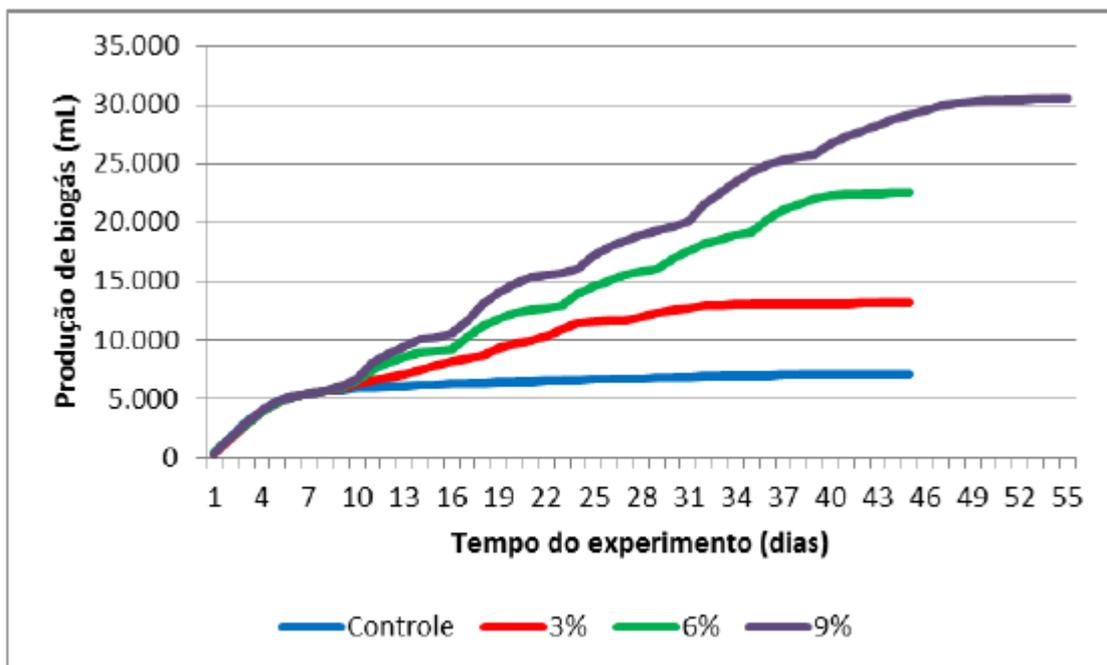
3.2.2.5. Outros fatores

Além dos fatores apresentados, podem ser citados outros que também influenciam na digestão anaeróbia, como o tempo de detenção hidráulica (TDH) que de acordo com Oliveira

Neto (2007), um reator anaeróbio foi submetido a três tempos de detenção hidráulica (TDH), os tempos foram 5, 6 e 10 horas, foi observado que para o tempo de 10 horas o reator apresentou melhor estabilidade e, conseqüentemente, uma melhor eficiência quando comparado com os outros dois tempos.

Outro fator que influencia na velocidade da digestão é a carga orgânica, segundo Mafaciolli (2012), na digestão anaeróbia de dejetos de aves foi observado que quando adicionado glicerina (3%, 6% e 9%), ou seja, aumento da carga orgânica, ao biodigestor houve produção maiores de biogás de acordo com o teor de glicerina adicionado, como é ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Comparação entre os tratamentos aplicados e a produção de biogás.



Fonte: MAFACIOLLI, 2012.

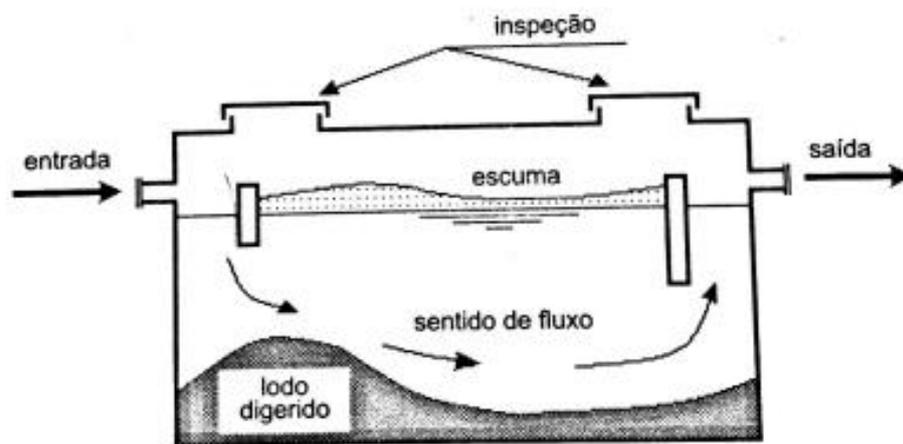
3.3. TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

3.3.1. Sistema tanque séptico – filtro anaeróbio

Esse sistema é conhecido também como sistema fossa-filtro, segundo Sperling (2005) esse sistema é amplamente utilizado no meio rural e/ou comunidades afastadas de pequeno porte. No tanque séptico é removido a maior parte dos sólidos suspensos, que quando sedimentam passam por processo anaeróbio no fundo do tanque e o filtro anaeróbio é responsável pela remoção complementar da DBO.

Os tanques sépticos são tanques de sedimentação, sem reação bioquímica na fase líquida, a remoção de DBO é limitada (SPERLING, 2005). Por esse motivo a necessidade da utilização de um filtro anaeróbio a jusante do tanque séptico, para remoção complementar da DBO. A Figura 5 ilustra um modelo de tanque séptico.

Figura 5: Esquema de um tanque séptico de câmara única.

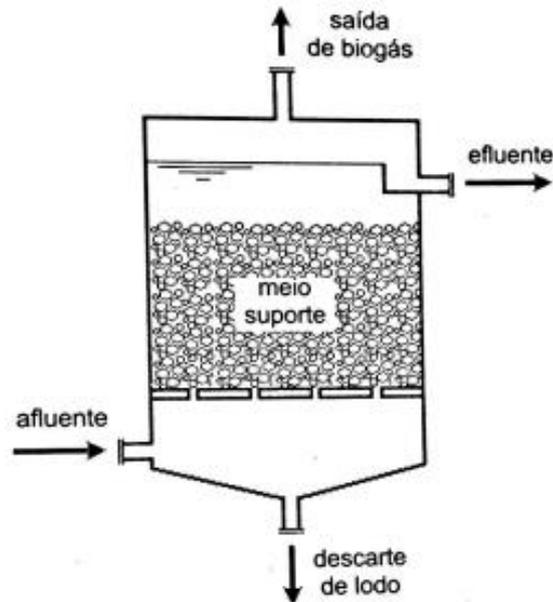


Fonte: SPERLING, 2005.

“O filtro anaeróbio é um biorreator de leito fixo, que promove a retenção da biomassa por adesão a um suporte inerte e por aprisionamento nos espaços intersticiais do leito” (SANT’ANNA JR, 2013, p.231). De acordo com Sperling (2005) esse tipo de filtro apresenta as seguintes características: o fluxo do líquido é ascendente; o filtro trabalha afogado; a carga de DBO por unidade de volume é bastante elevada e a unidade é fechada.

Para o tratamento de esgotos os filtros apresentam eficiência de remoção de DQO com valores de 70 a 88% (VAN HAANDEL et al *apud* SANT’ANNA JR, 2013). Para efluentes industriais a eficiência da remoção de DQO fica na faixa de 60 a 85% (SANT’ANNA JR, 2013). A Figura 6 ilustra o esquema de um filtro anaeróbio.

Figura 6: Esquema de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente.



Fonte: CHERNICHARO apud SANT'ANNA JR, 2013.

Um dos principais problemas desse tipo de biorreator é que mesmo de forma parcial “o entupimento e/ou colmatção de regiões do leito gera escoamentos preferenciais, com conseqüente queda da eficiência de remoção de DQO” (SANT'ANNA JR, 2013, p. 233). Devido a isso a busca por outros biodigestores como o UASB se intensificou.

3.3.2. Reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB)

O UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é um reator de fluxo ascendente de alto desempenho. Nesses reatores “a biomassa cresce dispersa no meio, e não aderida a um meio suporte especialmente incluído, como no caso dos filtros biológicos percoladores ou filtros anaeróbios” (SPERLING, 2005, p. 297).

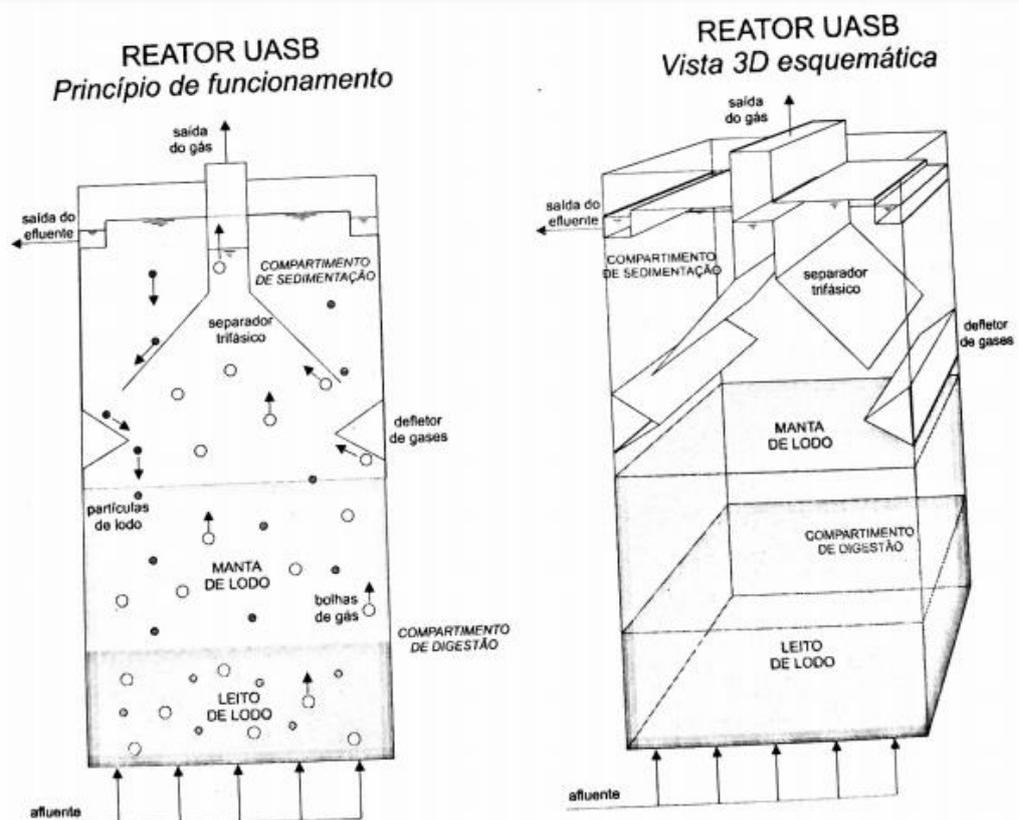
Apesar desse reator operar com lodo floculento, de acordo com Sant'Anna Jr (2013), o processo de granulação do lodo permitiu que esses reatores operassem com cargas hidráulicas até então impensáveis, pois os lodos granulares apresentam alta atividade metanogênica.

Como resultado da atividade anaeróbia, têm-se a formação de gases, como o metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). Para a coleta dos gases formados existe uma estrutura em formato de tronco piramidal invertido, que é responsável pela separação de gases, líquidos e sólidos, por isso essa estrutura é conhecida como separador trifásico.

Uma das vantagens desses reatores é a baixa produção de lodo, além disso “o lodo retirado dos reatores UASB já sai digerido e adensado, podendo ser simplesmente desidratado em leitos de secagem ou por meio de equipamentos mecânicos” (SPERLING, 2005, p. 300).

Uma possível desvantagem desse reator segundo Sperling (2005) é a limitação da eficiência de remoção da DBO, em média 70%, ou seja, inferior aos outros processos. Porém para tempos de retenção hidráulica de 3 a 10h esses reatores apresentam eficiência de remoção de DQO na faixa de 60 a 85% (SANT’ANNA JR, 2013). Esse tipo de reator está representado na Figura 7.

Figura 7: Representação esquemática do funcionamento de um reator UASB.



Fonte: SPERLING, 2005.

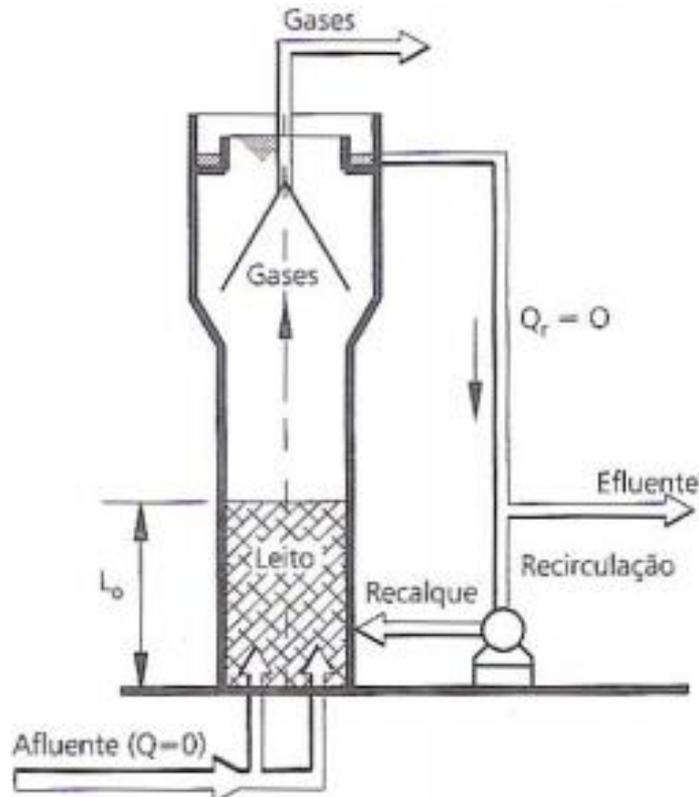
3.3.3. Reator anaeróbico de manta granular expandida (EGSB)

Esse tipo de reator consiste na movimentação ou expansão de uma camada de lodo efetivamente granulado e pode ser considerado uma variante do UASB. Esse reator consegue operar com velocidades ascensionais de líquido de 4 a 10 m/h e admitir altas cargas hidráulicas de até 40 kgDQO/m³.d (SANT’ANNA JR, 2013).

Essa alta velocidade ascensional se dá devido a relação altura/diâmetro resultar em um valor elevado. Para Field (*apud* SANT’ANNA JR, 2013) para cargas orgânicas de 20

kgDQO/m³.d aplicada em 198 plantas industriais resultou em uma eficiência na faixa de 85 a 90%. Esse tipo de reator está representado de forma ilustrativa na Figura 8

Figura 8: Esquema ilustrativo de um reator anaeróbico de manta granular expandida.



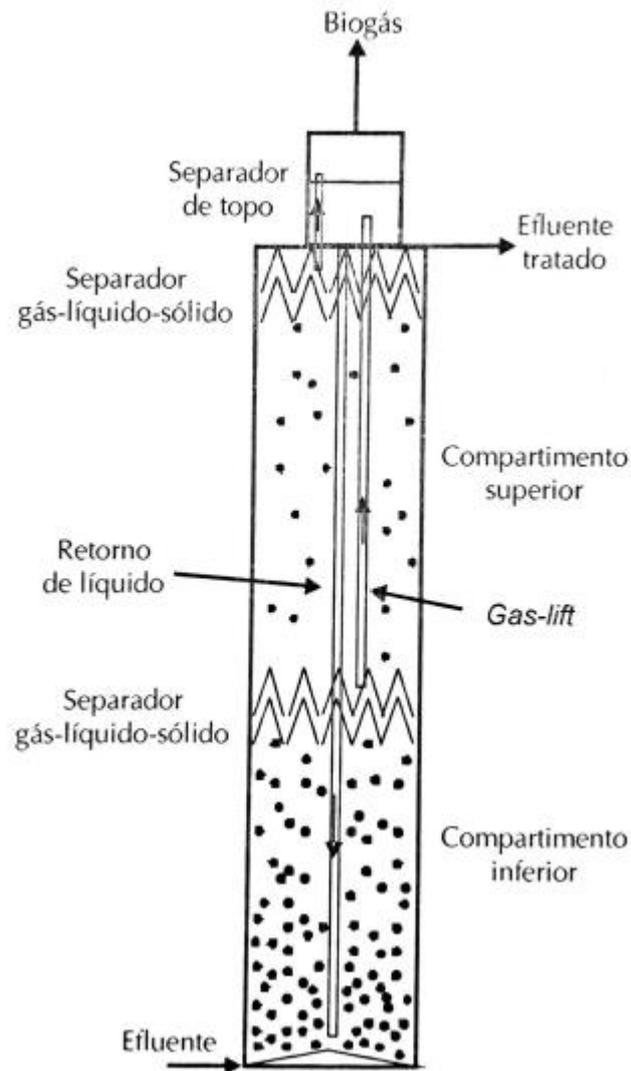
Fonte: CAMPOS, 1999.

3.3.4. Reator anaeróbico de circulação interna (IC)

Esse tipo de reator dispõe de dois sistemas de separação gás-líquido-sólido. O gás gerado e coletado segue por tubulações até o topo do reator, um dispositivo instalado na extremidade superior é responsável pela separação das fases. O gás é recuperado, enquanto o líquido e sólido voltam por gravidade a base do reator. Além disso, apresentam elevadas relação altura/diâmetro. (SANT'ANNA JR, 2013).

Para Driessen et al (*apud* SANT'ANNA JR, 2013), quando operado com carga de DQO na faixa de 700 a 3500 mg/L para efluente industrial, obteve-se uma eficiência de remoção entre 60 e 80%. Esse reator está ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Esquema ilustrativo de um reator anaeróbico de circulação interna (IC).



Fonte: SANT'ANNA JR, 2013.

3.3.5. Aterro sanitário

Segundo a NBR 8419/1992, aterro sanitário é definido como:

técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se for necessário (ABNT, 1992).

O aterro é uma das técnicas para tratamento de resíduos sólidos orgânicos com o melhor custo/benefício, além disso segundo ELK (2007) o aterro sanitário comporta-se como um reator dinâmico porque produz, a partir da decomposição da matéria orgânica, emissões como o biogás de aterro, efluentes líquidos, como os lixiviados, e resíduos mineralizados (húmus).

Os principais gases produzidos ao fim do processo anaeróbio dos aterros sanitários são o metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), “a composição básica dos gases é de cerca de 60% de metano (CH₄), 40% de dióxido de carbono (CO₂) e pequenas frações variáveis de outros gases” (ELK, 2007, p. 29).

3.3.6. Produção de biogás

A produção de biogás varia de acordo com diversos fatores, como a tecnologia empregada no tratamento, a carga orgânica a ser tratada, o tipo de matéria orgânica a ser tratada, as condições ambientais, entre outros.

No trabalho de Medeiros e Paez (2015), para uma concentração média de DBO igual a 512 mg/L inseridas em dois Reatores Anaeróbios de Leito Fluidizado (RALF) da ETE de Francisco Beltrão – PR com 60 L/s de vazão para cada reator, ocasionou uma produção de biogás igual a 520 m³/dia.

De acordo com Silva et al (2015), em uma ETE com 16 reatores UASB com vazão média de (988,08 ± 85,2) L/s para o sistema, com a DQO média do esgoto foi de (449,7 ± 143,2) mg/L, resultando em uma geração de biogás em torno de (84,30 ± 26,64) Nm³/h.

Ferreira (2013), analisou a utilização de biodigestores em cinco propriedades rurais na cidade de Castro no Paraná, a fim de tratar dejetos de animais e aproveitar os produtos gerados nesse tratamento. Os dados sobre a geração diária de biogás encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Produção diária de biogás em cinco propriedades rurais.

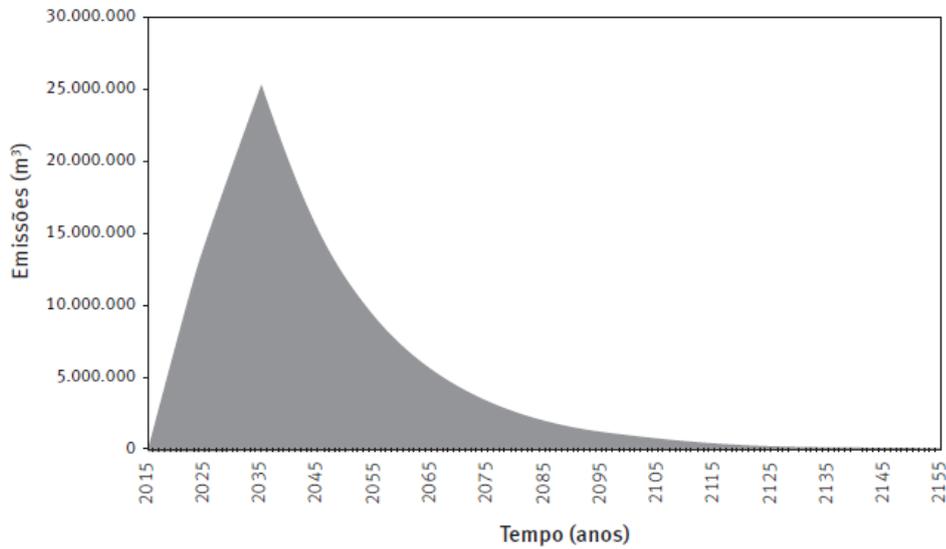
Propriedade	Área (ha)	Material a ser tratado	Produção diária de Biogás (m ³)
Granja Marujo	750	Dejetos suínos	2500
CTP	150	Dejetos bovinos	40
Chácara do São Francisco	-	-	150
Embutidos Nuzda	513	Dejetos bovinos	170
CEEPOM	-	Fezes e sangue de abatedouro	40

Fonte: Adaptado FERREIRA, 2013.

Para Piñas et al (2016), no aterro sanitário da cidade Três Corações, Minas Gerais foi estimado a geração de biogás utilizando dois Softwares, LandGEM (EPA) e Biogás-Aterros

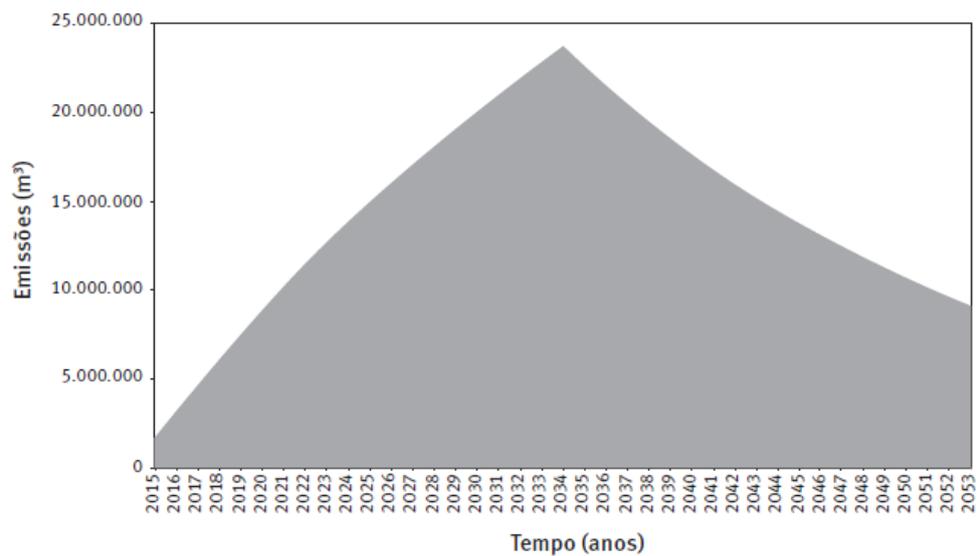
(CETESB), a estimativa da geração de biogás ao final dos 20 anos da vida útil do aterro foi de 521.519.200 m³ para o Software LandGEM (Figura 10) e 549.427.200 m³ (Figura 11) para o Software Biogás - Aterros.

Figura 10: Estimativa de emissões de metano (modelo LandGEM) em aterro sanitário.



Fonte: PINÃS et al, 2016.

Figura 11: Estimativa de emissões de metano (modelo Biogás) em aterro sanitário.



Fonte: PINÃS et al, 2016.

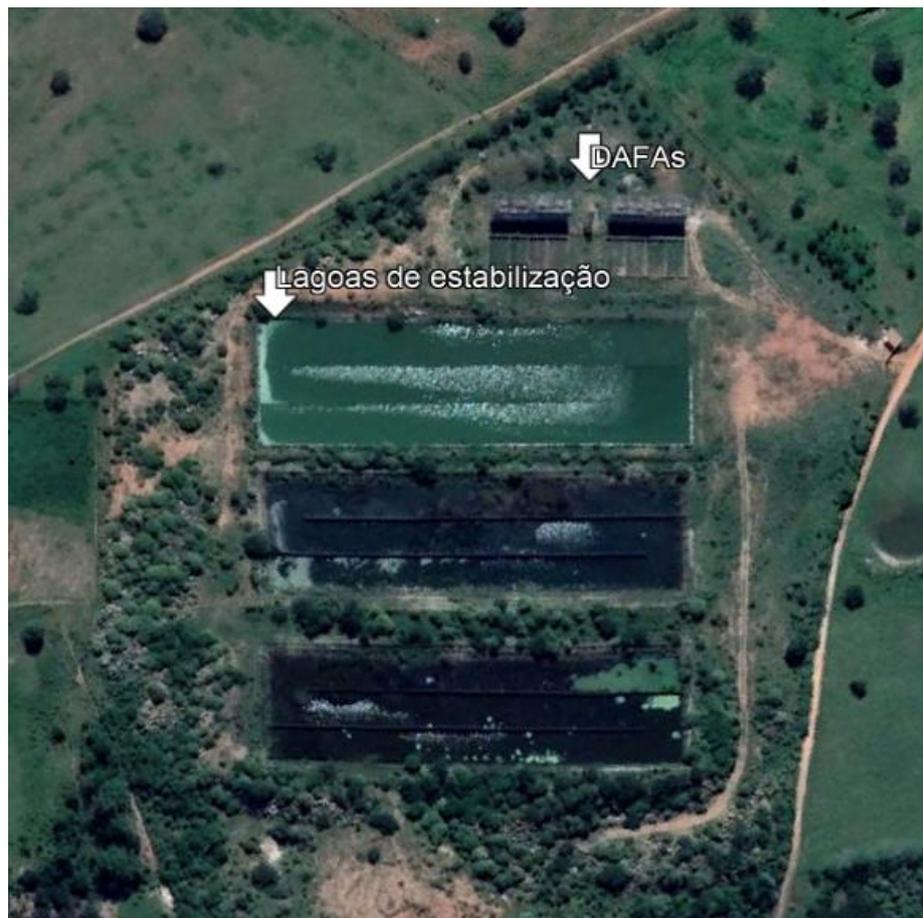
4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETE

4.1.1. ETE Santana do Ipanema

A ETE Santana do Ipanema localiza-se na cidade de Santana do Ipanema no estado de Alagoas. De acordo com as estimativas do IBGE 2018, Santana do Ipanema possui uma população de 47.486 habitantes e um território de 437,875 km². A ETE é ilustrada na Figura 12.

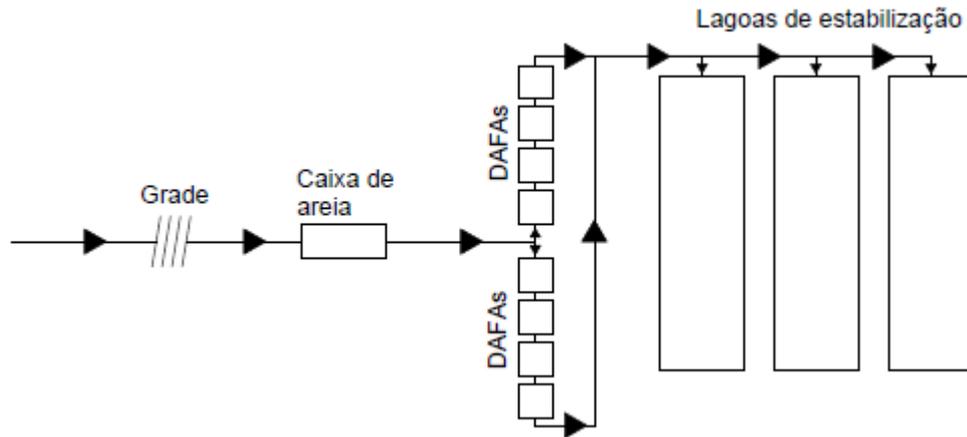
Figura 12: ETE Santana do Ipanema.



Fonte: Google Earth, 2019.

Segundo a CASAL (2019), a ETE Santana do Ipanema possui grade e caixa de areia como tratamento preliminar, oito Digestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (DAFA) realizam o tratamento primário, como tratamento secundário são utilizados os oito DAFAs da ETE seguidos de três lagoas de estabilização do tipo facultativa, o sistema não possui tratamento terciário. A Figura 13 ilustra um fluxograma do funcionamento da ETE.

Figura 13: Fluxograma da ETE Santana do Ipanema.



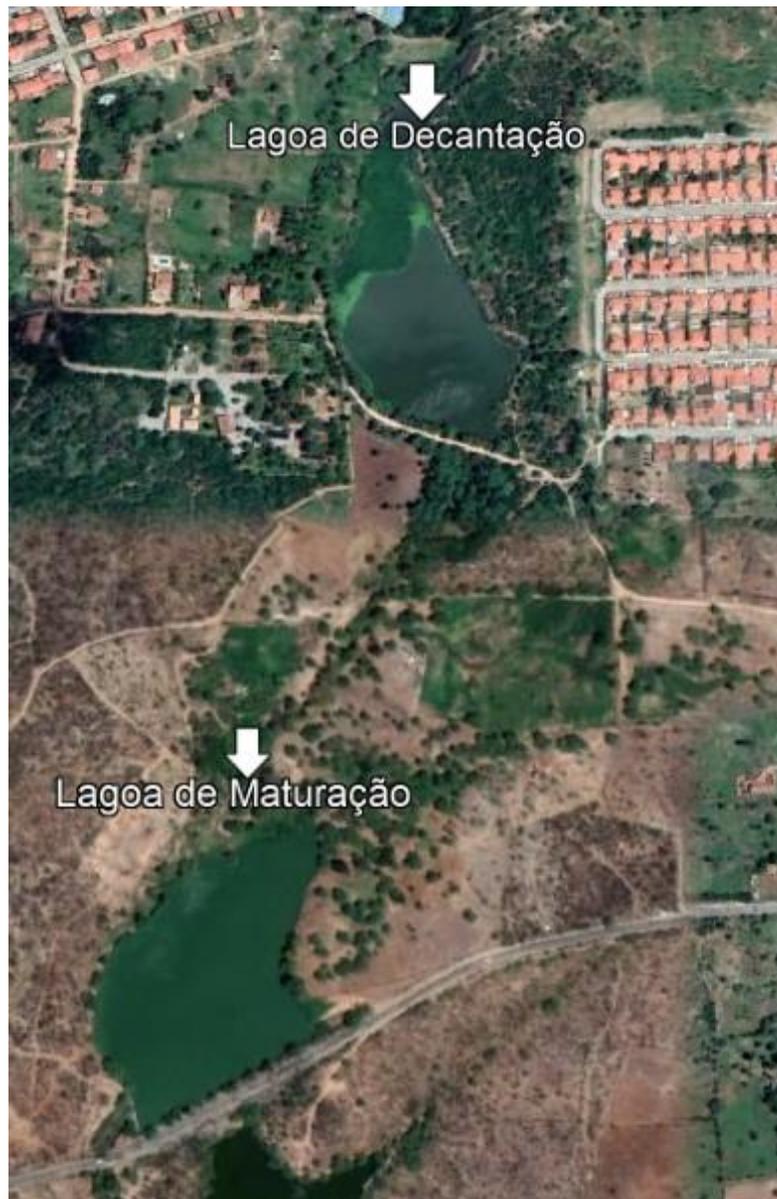
Fonte: O autor, 2019.

De acordo com a CASAL (2019), o sistema de rede coletora de esgoto recebe menos de 20% de contribuição da população atual, devido a isso a ETE não funciona na sua totalidade, apenas quatro DAFAs e uma lagoa de estabilização estão em operação.

4.1.2. ETE Xingó

A ETE Xingó localiza-se na cidade de Piranhas no estado de Alagoas, na região do sertão alagoano. De acordo com as estimativas do IBGE 2018, Piranhas possui uma população de 24.891 habitantes e um território de 410,112 km². A ETE é composta por uma lagoa de decantação e uma lagoa de maturação, essas lagoas foram construídas aproveitando-se o relevo local, como ilustra a Figura 14.

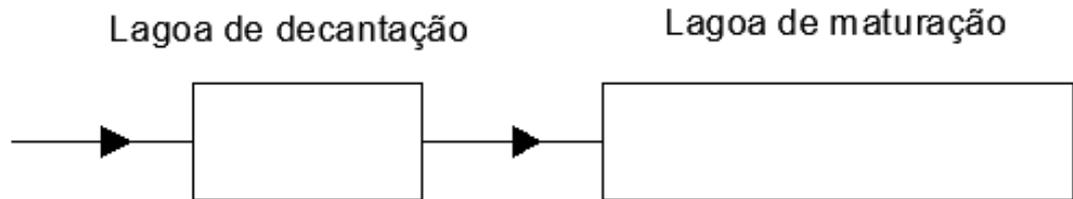
Figura 14: ETE Xingó.



Fonte: Google Earth, 2019.

Segundo a CASAL (2019), a ETE Xingó não possui tratamento preliminar, a lagoa de decantação realiza os tratamentos primário e secundário e a lagoa de maturação realiza o tratamento terciário. O fluxograma do funcionamento da ETE Xingó é ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Fluxograma da ETE Santana do Ipanema.



Fonte: O autor, 2019.

4.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

4.2.1. Estimativa da vazão afluyente a ETE

Devido à falta de medidores, não existem dados sobre as vazões que afluentes as ETEs de Piranhas e de Santana do Ipanema. Para esse trabalho foi estimado uma vazão de acordo com o número de economias ativas de redes coletoras de esgoto no mês de dezembro de 2018, fornecido pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) das respectivas cidades.

Por consequência da dificuldade em estimar o número de ligações clandestinas ligadas as redes coletoras de esgoto, as mesmas foram desprezadas nos cálculos das vazões. As vazões das ETEs de Piranhas e de Santana do Ipanema foram calculadas pela Equação 5.

$$Q = \frac{C \cdot \text{Pop} \cdot q}{86400} \quad (5)$$

Onde:

Q: Vazão (L/s);

C: coeficiente de retorno esgoto/água;

Pop: número de pessoas atendida pelas redes coletoras de esgotos (hab);

q: consumo de água efetivo “per capita” (L/hab.dia).

4.2.2. Estimativa da geração de biogás

Para o cálculo da estimativa de geração do biogás foram usados dados de concentrações de DBO dos efluentes que chegam nas ETEs de Piranhas e de Santana do Ipanema dos doze meses do ano de 2018, esses dados foram retirados dos relatórios de cada ETE fornecido pela CASAL das respectivas cidades.

Com os dados da vazão e da concentração média de DBO dos doze meses foi possível calcular a carga orgânica adicionada ao sistema por meio da Equação 6.

$$CG_{DBO} = Q \cdot C_{DBO} \quad (6)$$

Onde:

CG_{DBO} : Carga de DBO adicionada ao sistema ((KgDBO/dia);

Q : vazão do sistema (L/s);

C_{DBO} : concentração média de DBO que chega ao sistema (mg/L).

Para a ETE Santana do Ipanema foram utilizados valores reais de eficiência de remoção de acordo com os relatórios da ETE e para a ETE Xingó foi adotado um valor de eficiência de remoção teórica, devido a problemas na concepção da ETE. Com a carga de DBO adicionada ao sistema em um dia e com a eficiência de remoção de matéria orgânica (DBO) do mesmo foi calculado a carga de DBO removida do sistema pela Equação 7.

$$CG_{DBOr} = CG_{DBO} \cdot e \quad (7)$$

Onde:

CG_{DBOr} : Carga de DBO removida do sistema ((kgDBOr/dia);

CG_{DBO} : carga de DBO adicionada ao sistema ((kgDBO/dia);

e : eficiência de remoção de DBO do sistema (%).

Por fim, foi calculado a quantidade de biogás produzida em um dia para cada ETE, por meio da Equação 8.

$$Q_{Biogás} = CG_{DBOr} \cdot f \quad (8)$$

Onde:

$Q_{Biogás}$: Vazão de biogás produzido em um dia (m^3 /dia);

CG_{DBOr} : carga de DBO removida do sistema ((kgDBOr/dia);

f : fator de produção total de gás.

4.3. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO

O dado necessário para a alimentação do programa Biogás – Efluentes 1.0 é a produção mensal de metano (CH_4) na ETE de Piranhas e Santana do Ipanema. O CH_4 representa apenas

uma parcela de todo o biogás gerado no sistema, logo, para o cálculo da geração de CH₄ em um dia foi utilizado a Equação 9.

$$Q_{CH_4} = Q_{Biogás} \cdot C_{CH_4} \quad (9)$$

Onde:

Q_{CH_4} : Vazão de metano produzido em um dia (m³/dia);

$Q_{Biogás}$: vazão de biogás produzido em um dia (m³/dia);

C_{CH_4} : concentração de CH₄ presente em todo biogás produzido (%).

4.4. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO METANO

4.4.1. Software Biogás – Efluente 1.0

Para a determinação da geração de energia elétrica das duas ETEs utilizando o potencial energético do metano, foi utilizado nesse trabalho o programa "Biogás, geração e uso energético – Efluentes 1.0".

Esse programa foi desenvolvido pelo Governo do Estado de São Paulo com recursos do Governo Federal por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), juntamente com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA-SP) e a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB). Seu uso, reprodução e distribuição são livres, desde que seus desenvolvedores sejam citados.

O programa apresenta uma interface bem simples e de fácil entendimento, com ações sequenciais, a caracterização da ETE, a inserção dos dados de entrada, inserção de tecnologias, sugestão de valores a serem adotados e, por fim, a geração de um relatório com todos os dados inseridos e resultados encontrados. A interface do Software está ilustrada na Figura 16.

Figura 16: Interface do Software.



Fonte: Software Biogás – Efluentes 1.0, 2019.

Na inserção de dados o Software apresenta três opções de dados a serem inseridas para cálculo da vazão mensal de metano. A primeira opção consiste na medição direta de biogás gerado na ETE, ou seja, inserção da vazão mensal de metano; a segunda opção deve ser inserida a matéria total (kg) a ser tratada no sistema para cálculo da vazão mensal de metano; e por fim, na terceira opção a vazão mensal de metano é calculada de acordo com a carga orgânica do sistema. Para esse trabalho foi escolhido a primeira opção, sendo a vazão mensal de metano calculada usando as formas teóricas já apresentadas. A figura 17 mostra essas três opções, com a primeira opção selecionada.

Figura 17: Dados de entrada a ser escolhido.

Fonte: Software Biogás – Efluentes 1.0, 2019.

Apesar de não ser o principal definidor, os resultados gerados nesse software são as primeiras informações para se dar início a elaboração de um projeto para a obtenção dos benefícios do potencial energético do metano.

4.4.2. Estimativa da potência disponível e potência máxima possível

Para o cálculo da potência disponível na ETE, conhecida a vazão mensal de metano da ETE, o programa Biogás – Efluente 1.0 utiliza a Equação 10.

$$P_i = \frac{Q_i \cdot P_{C(\text{metano})}}{2.592.000} \cdot \frac{k}{1.000} \quad (10)$$

Onde:

P_i: Potência disponível (kW ou kJ/s)

Q_i: Vazão mensal de metano (m³CH₄/mês)

P_c (metano): Poder calorífico do metano (J/m³CH₄)

2.592.000s: 1 mês (s/mês)

k: 1.000 (adimensional)

Para o cálculo da potência máxima possível, a potência disponível foi multiplicada pelo rendimento de conversão energético, como ilustra a Equação 11.

$$P_{\max} = P_i \cdot e_{ce} \quad (11)$$

Onde:

P_{\max} : Potência máxima possível (kW ou kJ/s);

P_i : potência disponível (kW ou kJ/s);

e_{ce} : rendimento de conversão energético.

4.4.3. Estimativa da energia disponível

Para a estimativa da energia disponível em cada ETE o programa Biogás – Efluente 1.0 utilizou a Equação 12.

$$E_{\text{disponível}} = P_x \cdot \frac{1}{365 \cdot 24} \quad (12)$$

Onde:

$E_{\text{disponível}}$: Energia disponível (m^3CH_4 ou kWh);

P_x : potência disponível ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$ ou kW);

365: dias por ano (dia/ano);

24: horas por dia (h/dia).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

5.1.1. Estimativa da vazão afluyente a ETE

5.1.1.1. ETE Santana do Ipanema

De acordo com a CASAL (2019), o número de economias ativas em Santana do Ipanema em dezembro de 2018 que contribuem com vazão de esgoto para as redes coletoras é igual a 1.331 economias, as ligações clandestinas foram desconsideradas devido a impossibilidade de computá-las. Segundo o IBGE (2012), o número de habitantes residentes por economia na região Nordeste é igual a 3,4 pessoas por economia; para esse trabalho foi utilizado o valor de 4 pessoas por economias, logo a população atendida foi igual a 5.324 habitantes.

Segundo a norma Projeto de Redes Coletoras de Esgoto Sanitário NBR 9649 (ABNT, 1986), para recomendações de projeto o coeficiente de retorno água/esgoto é igual a 0,8. O coeficiente de consumo de água efetivo “per capita” pode ser adotado de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Faixas típicas do consumo per capita de água.

Porte da comunidade	Faixa da população (hab)	Consumo per capita (QPC) (L/hab.d)
Povoado rural	< 5.000	90 - 140
Vila	5.000 - 10.000	100 - 140
Pequena localidade	10.000 - 50.000	110 - 180
Cidade média	50.000-250.000	120 - 220
Cidade Grande	> 250.000	150 - 300

Fonte: SPERLING, 2005.

Como a cidade de Santana possui uma população, segundo estimativas do IBGE 2018, de 47.486 habitantes, ou seja, se enquadra no porte de pequena localidade, o coeficiente de consumo de água efetivo “per capita” se situa entre 110 e 180, para esse trabalho foi adotado o valor de 150 L/hab.dia. Com esses dados foi calculado a vazão da ETE Santana do Ipanema por meio da Equação 5.

$$Q = \frac{C \cdot \text{Pop} \cdot q}{86400}$$

$$Q = \frac{0,8 \cdot 5.324 \cdot 150}{86400}$$

$$Q = 7,39 \text{ L/s}$$

5.1.1.2. ETE Xingó

De acordo com a CASAL (2019), o número de economias ativas em Piranhas em dezembro de 2018 que contribuem com vazão de esgoto para as redes coletoras de esgoto é igual a 2.266 economias, as ligações clandestinas foram desconsideradas devido a impossibilidade de computá-las.

Como a ETE Xingó se localiza no mesmo estado da ETE Santana do Ipanema também foi adotado, de acordo com dados do IBGE (2012), o valor de 4 pessoas por economias, logo a população atendida foi igual a 9.064 habitantes.

O coeficiente de retorno água/esgoto foi o mesmo usado na ETE Santana do Ipanema, ou seja, igual a 0,8. O coeficiente de consumo de água efetivo “per capita” foi adotado de acordo com a Tabela 3, logo, como Piranhas possui uma população, de acordo com as estimativas do IBGE 2018, de 24.891 habitantes, se enquadra no porte de pequena localidade, logo, o coeficiente de consumo efetivo “per capita” se situa entre 110 e 180, para esse trabalho foi adotado o valor de 150 L/hab.dia.

Com esses dados foi calculado a vazão da ETE Xingó por meio da Equação 5.

$$Q = \frac{C \cdot \text{Pop} \cdot q}{86400}$$

$$Q = \frac{0,8 \cdot 9.064 \cdot 150}{86400}$$

$$Q = 12,59 \text{ L/s}$$

5.1.2. Estimativa da geração de biogás

A CASAL forneceu, por meio dos relatórios de cada ETE, os dados de concentrações de DBO dos efluentes que chegam nas ETES de Santana do Ipanema e de Piranhas, dos doze meses do ano de 2018. Esses dados se encontram na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4: Valores de DBO e eficiência de remoção de DBO da ETE Santana do Ipanema.

MÊS/ANO	DBO (mgO₂/L) - ESGOTO BRUTO	DBO (mgO₂/L) - ESGOTO TRATADO	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE DBO(%)
jan/18	220,00	42,00	80,91
fev/18	480,00	240,00	50,00
mar/18	394,10	44,00	88,84
abr/18	80,00	16,00	80,00
mai/18	320,00	32,20	89,94
jun/18	300,00	90,00	70,00
jul/18	220,00	80,00	63,64
ago/18	280,00	35,84	87,20
set/18	180,00	14,00	92,22
out/18	460,00	42,00	90,87
nov/18	280,00	70,00	75,00
dez/18	300,00	28,00	91,67
MÉDIA ANUAL	292,84	61,17	79,94

Fonte: Adaptado CASAL, 2019.

Tabela 5: Valores de DBO da ETE Xingó.

MÊS/ANO	DBO (mgO₂/L) - ESGOTO BRUTO
jan/18	280,00
fev/18	600,00
mar/18	280,00
abr/18	180,00
mai/18	540,00
jun/18	660,00
jul/18	480,00
ago/18	200,00
set/18	280,00
out/18	400,00
nov/18	320,00
dez/18	300,00
MÉDIA ANUAL	376,67

Fonte: Adaptado CASAL, 2019.

Para os cálculos desse trabalho foram utilizados os valores médios de concentração de DBO de cada ETE, retirados da Tabela 4 e Tabela 5. As ETEs Santana do Ipanema e Xingó apresentaram concentrações média de DBO iguais a 292,84 mgO₂/L e 376,67 mgO₂/L, respectivamente. Com esses valores foi calculado o valor da carga orgânica adicionada a cada sistema utilizando a Equação 6.

$$CG_{\text{DBO}} = Q \cdot C_{\text{DBO}}$$

- ETE Santana do Ipanema

$$CG_{\text{DBO}} = \frac{7,39 \cdot 292,84 \cdot 86400}{10^6}$$

$$CG_{\text{DBO}} = 187,09 \text{ kgDBO/dia}$$

- ETE Xingó

$$CG_{\text{DBO}} = \frac{12,59 \cdot 376,67 \cdot 86400}{10^6}$$

$$CG_{\text{DBO}} = 409,69 \text{ kgDBO/dia}$$

Com a carga orgânica de cada ETE calculada foi possível calcular a carga orgânica removida de cada sistema utilizando a Equação 7, onde a eficiência utilizada na ETE Santana do Ipanema foi, segundo a Tabela 4, de 79,94%.

Para a ETE Xingó, por apresentar erro na concepção e devido a isso deve ocorrer possíveis infiltrações de água no sistema acarretando na alteração da eficiência real da ETE, foi adotada uma eficiência teórica.

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), lagoas de maturação quando antecedidas por outras lagoas apresentam eficiência de remoção de DBO de 80 a 85%, para esse trabalho foi adotado uma eficiência de 85% para a ETE Xingó. Portanto, as cargas orgânicas removidas de cada ETE de acordo com Equação 7, foram as seguintes:

$$CG_{\text{DBOr}} = CG_{\text{DBO}} \cdot e$$

- ETE Santana do Ipanema

$$CG_{\text{DBOr}} = 187,09 \cdot 79,94\%$$

$$CG_{\text{DBOr}} = 149,56 \text{ kgDBOr/dia}$$

- ETE Xingó

$$CG_{DBOr} = 409,69 \cdot 85\%$$

$$CG_{DBOr} = 348,24 \text{ kgDBOr/dia}$$

Como apenas parte da DBO removida se converte em biogás, foi necessário que a carga orgânica de DBO removida fosse convertida por meio de um coeficiente, conhecido como fator de produção total de gás. Esse coeficiente pode ser adotado como igual a $0,12 \text{ m}^3/\text{kgDBOr}$ para tratamento de esgotos sanitários (NUVOLARI *apud* MEDEIROS E PAEZ, 2015), esse mesmo valor foi adotado para esse trabalho.

Com isso, foi possível o cálculo da estimativa de biogás gerado em um dia para cada ETE por meio da Equação 8.

$$Q_{\text{Biogás}} = CG_{DBOr} \cdot f$$

- ETE Santana do Ipanema

$$Q_{\text{Biogás}} = 149,56 \cdot 0,12$$

$$Q_{\text{Biogás}} = 17,95 \text{ m}^3/\text{dia}$$

- ETE Xingó

$$Q_{\text{Biogás}} = 348,24 \cdot 0,12$$

$$Q_{\text{Biogás}} = 41,79 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Portanto a vazão diária estimada de biogás gerada nas ETES Santana do Ipanema e Xingó de $17,95 \text{ m}^3/\text{dia}$ e $41,79 \text{ m}^3/\text{dia}$, respectivamente.

O Quadro 1 apresenta um resumo de todos os resultados encontrados para as duas ETES.

Quadro 1: Resumo da estimativa de biogás.

ETE	Q (L/s)	CG_{DBO} kgDBO/dia	CG_{DBOr} (kgDBOr/dia)	$Q_{\text{Biogás}}$ (m^3/dia)
Santana do Ipanema	7,39	187,09	149,56	17,95
Xingó	12,59	409,69	348,24	41,79

Fonte: O autor, 2019.

5.2. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE METANO

A vazão de biogás calculada é composta de diversos gases, principalmente CO₂ e CH₄, porém para o cálculo do potencial energético desse trabalho apenas a vazão de CH₄ foi utilizada. Portanto, foi necessária minorar a quantidade de biogás gerado pela concentração de CH₄ existente no mesmo.

Como para eficiência de remoção de DBO foi utilizado um valor de eficiência global para os dois sistemas, a concentração de CH₄ foi também um valor global para cada sistema. No trabalho de Tietz et al (2014), a concentração de CH₄ no biogás produzido por biodigestores teve valores entre 59,06% e 62,48%, para esse trabalho foi utilizado um valor intermediário de 61%. Para o cálculo da estimativa de metano gerado nas duas ETEs, foi utilizado a Equação 9.

$$Q_{CH_4} = Q_{Biogás} \cdot C_{CH_4}$$

- ETE Santana do Ipanema

$$Q_{CH_4} = 17,95 \cdot 61\%$$

$$Q_{CH_4} = 10,95 \text{ m}^3/\text{dia}$$

- ETE Xingó

$$Q_{CH_4} = 41,79 \cdot 61\%$$

$$Q_{CH_4} = 25,49 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Como o programa Biogás – Efluentes 1.0 utiliza a vazão mensal para efetuar os seus cálculos, esses valores de vazão diária encontrada foram multiplicados por trinta dias (um mês), resultando em uma vazão mensal de CH₄ igual a 328,43 m³/mês para a ETE Santana do Ipanema e 764,7 m³/mês para a ETE Xingó.

O Quadro 1 apresenta um resumo de todos os resultados encontrados para as duas ETEs.

5.3. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO METANO

5.3.1. ETE Santana do Ipanema

O poder calorífico inferior é um valor utilizado para se determinar o potencial teórico de energia contido nos combustíveis. Para esse trabalho, o software Biogás – Efluentes 1.0 adotou para o poder calorífico do metano um valor igual 35530 kJ/m³CH₄, valor aproximadamente igual ao encontrado na literatura e observado na Tabela 6.

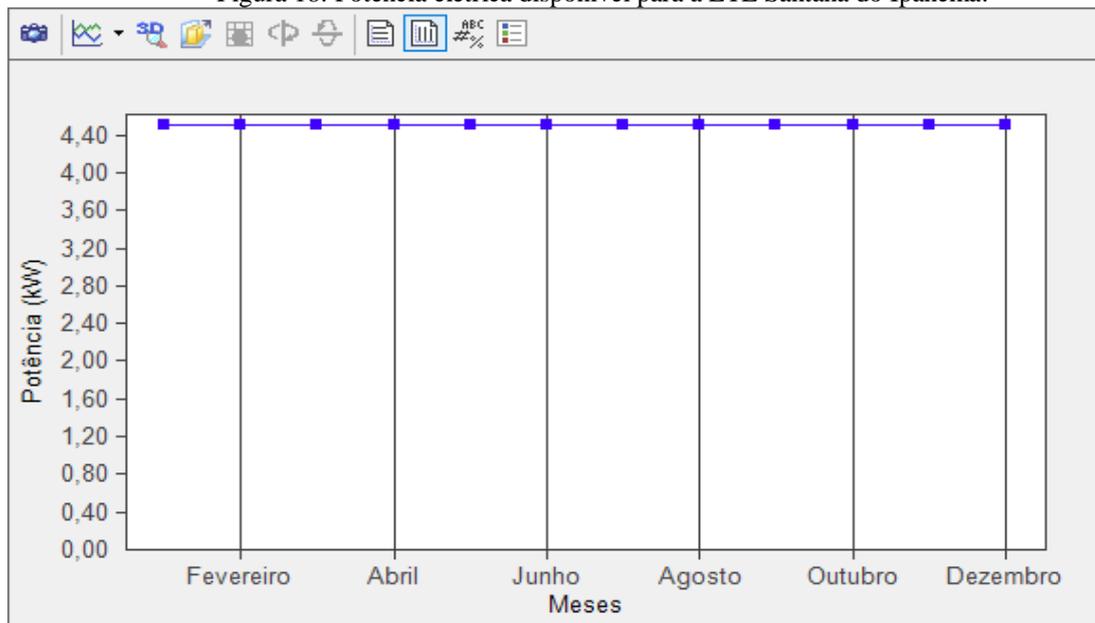
Tabela 6: Poder calorífico inferior de combustíveis gasosos.

GÁS	PODER CALORÍFICO (kJ/m ³ CH ₄)
Metano	35564
Propano	92048
Butano	117153
Gás de coqueria	18410
Gás de cidade	16736
Gás natural	35790
Biogás	23012

Fonte: Adapado SOUZA, 2016.

Como a geração mensal de biogás para a ETE Santana do Ipanema foi igual a 328,43 m³/mês o programa Biogás – Efluentes 1.0 utilizou a Equação 10 para estimar o potencial de energia elétrica disponível para o sistema, o valor médio encontrado foi de 4,50 kW. Esse valor foi ilustrado em forma de gráfico na Figura 18.

Figura 18: Potência elétrica disponível para a ETE Santana do Ipanema.



Fonte: Software Biogás – Efluentes 1.0, 2019.

Na sequência o programa utiliza a Equação 11 para cálculo da potência máxima possível. Para Coldebella (2006), a eficiência de conversão de energia varia de acordo com a potência, com valores situando entre 25% e 38%. O Software sugere um valor de eficiência de

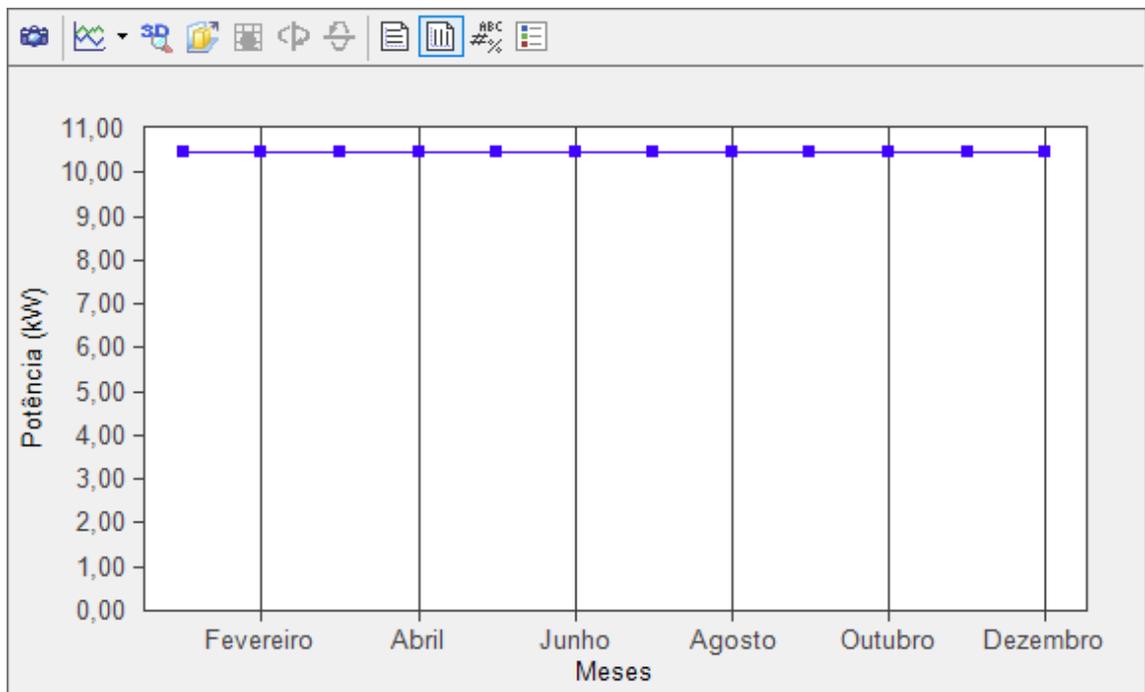
conversão de energia igual a 33%, por ser um valor intermediário encontrado na literatura, esse valor foi o utilizado para os cálculos desse trabalho. Com isso, o valor de potência máxima possível encontrado pelo programa foi de 1,41 kW.

Por fim, para o cálculo da energia elétrica disponível no sistema o programa utilizou a Equação 12, considerando os dados já adicionados e calculados anteriormente, encontrando um valor de energia útil igual a 931 kWh/mês.

5.3.2. ETE Xingó

A ETE Xingó apresentou uma geração mensal de metano igual a 764,7 m³/mês, o programa Biogás – Efluentes 1.0 estimou a energia elétrica disponível para a ETE por meio da Equação 10, utilizando o mesmo poder calorífico adotado para a ETE Santana do Ipanema, o valor estimado foi de 10,48 kW. A Figura 19 mostra esse resultado em forma de gráfico.

Figura 19: Potência elétrica disponível para a ETE Xingó.



Fonte: Software Biogás – Efluentes 1.0, 2019.

Com o valor da eficiência de conversão de energia igual a 33%, valor sugerido pelo programa e o mesmo utilizado para a ETE Santana do Ipanema, o programa utilizou Equação 11 para calcular a potência máxima possível. Com isso, o valor de potência máxima possível encontrado pelo programa foi de 3,29 kW.

Por fim, para o cálculo da energia elétrica disponível no sistema o programa utilizou a Equação 12, considerando os dados já adicionados e calculados anteriormente, encontrando um valor de energia elétrica útil igual a 2.165 kWh/mês. A ETE Xingó apresentou uma geração de energia elétrica maior que a ETE Santana do Ipanema devido ao maior número de pessoas atendidas por essa ETE.

O Quadro 1 apresenta um resumo de todos os resultados encontrados para as duas ETES.

Quadro 2: Resumo da estimativa de energia disponível.

ETE	Q_{CH_4} (m ³ /mês)	P_i (kW)	$P_{m\acute{a}x}$ (kW)	E_i (kWh/mês)
Santana do Ipanema	328,43	4,5	1,41	931
Xingó	764,7	10,48	3,29	2.165

Fonte: O autor, 2019.

5.4. GERAÇÃO DE ENERGIA POR VOLUME DE BIOGÁS

A ETE Santana do Ipanema com uma carga de DBO de 292,84 mgO₂/L produziu 532,42 m³ de biogás por mês, apresentou também uma geração de energia útil igual a 1,75 kWh por m³ de biogás produzido. Já a ETE Xingó com uma carga de DBO de 376,67 mgO₂/L foi gerado 1253,66 m³ de biogás, resultando em uma geração de energia útil de 1,73 kWh por m³ de biogás produzido.

No trabalho de Medeiros e Paez (2015), a ETE Marrecas da cidade Francisco Beltrão/PR teve uma geração mensal de biogás de 15.300 m³ e apresentou uma geração de energia útil de aproximadamente 1,61 kWh por m³ de biogás produzido. Coldebella (2006), analisou a geração de energia elétrica por meio do biogás produzido a partir de dejetos da bovinocultura de leite e suinocultura, apresentando geração de energia útil de 0,76 e 0,94 kWh por m³ de biogás produzido para a bovinocultura e suinocultura, respectivamente.

No trabalho de Pereira et al (2015), na análise da energia elétrica produzido por meio do biogás oriundo de dejetos dos bovinos de corte e suínos do Campus da UFSM na cidade de Santa Maria/RS, foi produzido uma energia útil de 1,67 kWh por m³ de biogás produzido, tanto para os bovinos de corte quanto para os suínos.

Já para aterros sanitários, segundo Piñas et al (2016), o aterro sanitário da cidade Três Corações/MG ao final da vida útil (20 anos), apresentará um volume de 549.527.200 m³ de biogás e produzirá uma energia acumulada de 141,31 GWh, apresentando, assim, uma energia por volume de biogás igual 0,26 kWh por m³ de biogás produzido. A

Tabela 7 apresenta os resultados quanto a geração de energia por volume de biogás, dos autores mencionados.

Tabela 7: Energia útil por volume de biogás.

Local/Tipo	Volume de biogás (m ³)	Energia útil (kWh)	Energia útil por volume de biogás (kWh/m ³ de biogás)	Autor
ETE Santana do Ipanema	532,42	931	1,75	Próprio autor (2019)
ETE Xingó	1.253,66	2.165	1,73	Próprio autor (2019)
ETE Marrecas	15.300	25.080	1,64	Medeiros e Paez (2015)
Bovinocultura de leite	7,24	5,51	0,76	Coldebella (2006)
suinocultura	7,33	6,913	0,94	Coldebella (2006)
Bovinocultura de corte	360	600	1,67	Pereira et al (2015)
Suinocultura	132	220	1,67	Pereira et al (2015)
Aterro sanitário	549.527.200	141.310.000	0,26	Piñas et al (2016)

Fonte: O autor, 2019.

Portanto, apesar que as duas ETE's analisadas nesse trabalho não trabalham com a carga total das suas respectivas cidades, as mesmas apresentaram uma satisfatória conversão do volume de biogás produzido em energia elétrica, quando comparada a outros trabalhos.

Por fim, foi calculado a quantidade residências que poderiam ser atendidas pela energia elétrica gerada por cada ETE. Segundo a EPE (2017) o consumo médio residencial de energia elétrica do estado de Alagoas em 2016, atingiu 105,9 kWh/mês, com isso a quantidade de residências que poderiam ser atendidas foi de aproximadamente 9 e 20 residências para a ETE Santana do Ipanema e ETE Xingó, respectivamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a ETE Santana do Ipanema, apesar de atender menos de 20% da população de Santana do Ipanema, os resultados gerados pelo programa Biogás – Efluentes 1.0 demonstram uma conversão energética satisfatória.

A ETE Xingó; o percentual da população atendida não foi informado, porém essa ETE não atende a população de Piranhas em sua totalidade; mas também apresentou um resultado satisfatório para a conversão energética com os resultados gerados pelo programa.

Os resultados gerados pelo programa Biogás – Efluentes 1.0 são um dos indicativos, porém não o mais importante, para a possibilidade de elaboração de um projeto para instalação de um sistema de geração de energia elétrica proveniente do biogás das ETEs.

Portanto, as duas ETEs estudadas nesse trabalho apresentaram resultados favoráveis para a possibilidade de se iniciar um projeto de sistema de coleta de biogás e geração de energia elétrica, para a verificação da viabilidade econômica desse sistema.

Além de trazer benefícios ambientais para o estado de Alagoas, a implantação de um sistema desse tipo em ETEs seria um projeto pioneiro para o sertão alagoano incentivando o aumento de investimentos no setor de saneamento básico da região. Bem como, esse sistema contribuiria para a diversificação da matriz energética local, diminuindo, assim, a sobrecarga sobre a matriz hidráulica.

Como sugestão para trabalhos futuros: estimar ou adotar um valor de eficiência de remoção de DBO e de concentração de CH₄ para cada tecnologia do sistema a ser analisado, analisar a viabilidade econômica da implantação de um sistema de coleta de biogás e de geração de energia por meio desse biogás e fazer um estudo da eficiência em laboratório da ETE Xingó e propor alternativas para adequação da mesma.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.
- Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento.** 3. ed. rev. – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004.
- Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde.** – 4. ed. – Brasília: Funasa, 2015.
- BORGES, A. C. (2003). **Influência da estratégia de alimentação no desempenho do reator anaeróbio em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas. **Laudo da ETE Santana do Ipanema.** Santana do Ipanema, 2019.
- CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas. **Laudo da ETE Xingó.** Piranhas, 2019.
- CAMPOS, J.R. (Coord). 1999. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB.
- CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B. **Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n. 1, p. 97-102, 1998.
- COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2006.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2017.** Brasília-DF, 2017.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em : <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 20/07/2019.
- Elk, A. G. H. P. van. **Redução de emissões na disposição final / Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk.** Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007.
- FERREIRA, J et al. **Produção de biogás e funcionamento de biodigestores no ensino de ciências.** 2013. Monografia (Especialização no Ensino de Ciências). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HENN, A. et al. **Planejamento ambiental e adequação à legislação ambiental de uma pequena propriedade suinícola com relação à geração, tratamento e destino dos dejetos suínos em Braço do Norte/SC.** In: XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, San Juan, 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008).** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15/12/2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Número médio de moradores por domicílio particular permanente, por Grandes Regiões, segundo o sexo e a condição de atividade, na semana de referência, das pessoas de referência dos domicílios - 2011-2012.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 09/05/2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa da população dos municípios -2018.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 09/05/2019.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos (6ª Ed).** Rio de Janeiro: ABES, 2011.

MACHADO, L. L. N. **Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto.** 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MAFACIOLLI, D. **Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia utilizando dejetos de aves de postura com suplementação de glicerina bruta.** 2012. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2012.

MEDEIROS, S. de; PAEZ, S. **Potencial de geração de energia elétrica a partir da digestão anaeróbia de esgoto sanitário.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2015.

OLIVEIRA NETTO, A. P. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PEREIRA, M. S. et al. **Energias renováveis: biogás e energia elétrica provenientes de resíduos de suinocultura e bovinocultura na UFSM.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 3, p.239-247. Santa Maria, 2015.

PIÑAS, J.A.V. et al. **Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil.** R. bras. Est. Pop., v.33, n.1, p.175-188, jan/abr. Rio de Janeiro, 2016.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos.** São Paulo: Editora ABES, 2006.

RODRIGUES, A. A. L. de S. **Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

SANT’ANNA JR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes fundamentos e aplicações (2ª ed)**. Rio de Janeiro: Editora INTERCIÊNCIA, 2013.

SILVA, J. P. et al. **Comparação da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de diferentes tipos de lodo**. SCIENTIA CUM INDUSTRIA (SCI. CUM IND.), v.4, n. 2, p. 69-73, 2016.

SILVA, T. C. F. et al. **Utilização do biogás proveniente do tratamento do esgoto doméstico para geração de eletricidade**. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

SPERLING, M. V. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (3ª ed)**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

SOUZA, S. N. M. de. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2016.

SROUR, S. **A reforma do estado e a crise no setor de energia elétrica: uma visão crítica do caso brasileiro**. 2005. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Rio de Janeiro, 2005.

TIETZ, C. M. et al. **Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 3, p. 86-96, 2014.

VILELA, F. R. **Biometanização: estudo da influência do lodo e da serragem no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

WANDERLEY, S. S. C. **Energia solar fotovoltaica: potencial nordestino com enfoque em Alagoas e seus impasses políticos e econômicos para micro e minigeração distribuída/ Silvanney Stonny Cordeiro Wanderley**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Alagoas, Santana do Ipanema, 2017.