

VITOR GONÇALVES SAVI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUZIDO NA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) SANTA LUZIA
(CRICIÚMA/SC)**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Geremias

**ARARANGUÁ
2019**

Ficha de identificação da obra

Savi, Vitor Gonçalves

Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na estação de tratamento de esgoto (ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC) / Vitor Gonçalves Savi ; orientador, Reginaldo Geremias, 2019.

94 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2019.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Estação de Tratamento de Esgoto. 3. Biogás. 4. Eletricidade. 5. Emissões de CO₂. I. Geremias, Reginaldo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. III. Título.

VITOR GONÇALVES SAVI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUZIDO NA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) SANTA
LUZIA (CRICIÚMA/SC)**

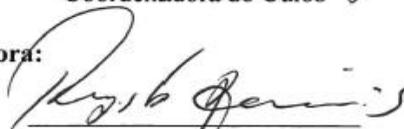
Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para obtenção do
Título de “Mestre em Energia e Sustentabilidade” e aprovado em sua
forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Energia e
Sustentabilidade

Araranguá, 28 março de 2019.



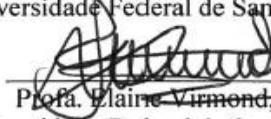
Profª. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



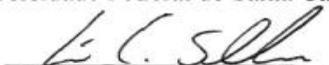
Prof. Reginaldo Geremias, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Profª. Elaine Virmond, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. César Cataldo Scharlau, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Videoconferência

Leandro Janke, Dr.

Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Suécia

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, saúde e perseverança.

À minha família, pelo amor, pela educação e apoio durante toda vida.

À minha noiva Maína, pelo companheirismo, apoio e amor em todos os momentos dessa jornada.

Aos amigos, por estarem presentes nos momentos de dificuldade e também por compartilharem os momentos de alegria.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Geremias, por ser meu orientador e compartilhar o conhecimento para desenvolvermos esta Dissertação.

À professora Dra. Kátia Cilene Rodrigues Madruga, pela maestria à frente na coordenação do PPGES.

Aos colegas de mestrado, que compartilharam o conhecimento, alegrias e também os momentos de dificuldade neste período.

Aos professores da UFSC, que de algum modo compartilharam conhecimento no PPGES.

A todos que, assim como eu, buscam o conhecimento e progresso.

“Afirmo muitas vezes que, se você medir aquilo que está falando e expressar em números, você conhece alguma coisa sobre o assunto; mas, quando você não o pode exprimir em números, seu conhecimento é pobre e insatisfatório”. William Thompson (Lord Kelvin)

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC), com vistas a subsidiar futuros projetos de aproveitamento dessa energia na ETE e amenizar os impactos ambientais de esgotos sanitários. Para tanto, foram obtidos os dados das análises de parâmetros físico-químicos do afluente e do efluente da ETE e de seu consumo de energia elétrica no período de 2016 e 2017. A partir desses dados, foram realizados os cálculos da estimativa de geração de biogás e de conversão de energia elétrica, bem como da emissão atmosférica de dióxido de carbono (CO_2). Por fim, foram realizados os cálculos de estimativa do capital a ser investido e do Tempo de Retorno de Capital (*Payback*). Os resultados permitem demonstrar que o processo de biodigestão anaeróbica nos reatores da ETE se desenvolvem em pHs próximos da neutralidade (afluente = $6,68 \pm 0,26$; efluente = $7,05 \pm 0,11$) e em temperaturas mesofílicas ($24,2 \pm 2,4$ °C). A eficiência de remoção de DQO dos reatores assumiu o valor de 49%. A produção estimada de metano (CH_4) e de biogás foi mais pronunciada nos meses março (19%), julho (16%) e setembro (14%). A geração total estimada de energia elétrica foi de 788.975 kWh, cujo valor é capaz de suprir em 95% o consumo de energia elétrica da ETE, gerando uma economia anual de R\$ 145.960,44. O aproveitamento do biogás poderia reduzir em 93,5% as emissões totais de CO_2 no período considerado. A estimativa do capital total a ser investido foi R\$ 216.814,32 e o Tempo de Retorno do Capital foi estimado em 21 meses. A partir dos resultados obtidos, se pode concluir que o uso do biogás para a geração de energia elétrica na ETE Santa Luzia se mostra promissor, sendo capaz de reduzir os seus custos operacionais e amenizar os impactos ambientais provocados por esgotos sanitários, contribuindo para o fomento à utilização de fontes energéticas renováveis.

Palavras chave: Estação de Tratamento de Esgoto. Biogás. Eletricidade. Emissões de CO_2 .

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the potential of electric energy generation from biogas produced at Santa Luzia Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Criciúma - SC, in order to support future projects on the use of this energy at WWTP and mitigate environmental impacts of sanitary sewage. For that, the data of the physical-chemical parameters analysis of affluent and effluent were obtained along with WWTP and its electricity consumption in the period of 2016 and 2017. With these data, estimated calculus of biogas generation and energy conversion, as well as the carbon dioxide (CO₂) atmospheric emission were done. Finally, calculations were made to estimate the capital to be invested and the payback. The results allow to demonstrate that the anaerobic biodegradation process in the WWTP reactors develop at pHs close to neutrality (affluent = 6.68 ± 0.26 , effluent = 7.05 ± 0.11) and at mesophilic temperatures (24.2 ± 2.4 ° C). The COD removal efficiency of the reactors took the value of 49%. The estimated production of methane (CH₄) and biogas was more pronounced in the months of March (19%), July (16%) and September (14%). The estimated total electricity generation was 788.975 kWh, the value of which is capable of supplying 95% the energy consumption of WWTP, generating annual savings of R\$ 145.960,44. The use of biogas can reduce 93,5% of the total CO₂ emissions during that period. The estimated total capital to be invested was R\$ 216.814,32 and the payback was estimated in 21 months. From the results obtained, it can be concluded that the use of biogas for generating electricity at Santa Luzia WWTP shows promise, being able to reduce its operating costs and mitigate environmental impacts caused by sanitary sewage, contributing to the development use of renewable energy sources.

Keywords: Wastewater Treatment Plant. Biogas. Electricity. CO₂ emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagramas de vazão típicos para o tratamento de esgotos e de biossólidos.....	33
Figura 2 - Principais etapas da biodigestão anaeróbica.....	35
Figura 3 - Biodigestor modelo indiano.....	44
Figura 4 - Biodigestor modelo chinês.....	45
Figura 5 - Biodigestor modelo canadense.....	45
Figura 6 - Biodigestor do tipo batelada.....	46
Figura 7 - Reator UASB.....	47
Figura 8 - Estrutura de uma turbina a gás.....	49
Figura 9 - Estrutura de uma microturbina.....	50
Figura 10 - Motor de combustão interna operando num sistema de cogeração.....	51
Figura 11 - Estrutura física da ETE Santa Luzia.....	57
Figura 12 - Fluxograma do tratamento de esgoto na ETE Santa Luzia.....	58
Figura 13 - Estimativa da carga mensal média de DQO afluente ao reator convertida em metano em 2016 e 2017.....	71
Figura 14 - Estimativa de produção volumétrica mensal média de metano em 2016 e 2017.....	72
Figura 15 - Estimativa de produção volumétrica mensal média de biogás em 2016 e 2017.....	73
Figura 16 - Estimativa de geração e consumo mensal médio de energia elétrica em 2016 e 2017.....	74
Figura 17- Estimativa de emissões médias mensais produzidas e evitadas de CO ₂ em 2016 2017.....	76

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Características físicas, químicas e biológicas de esgoto sanitário e suas fontes.....	30
Tabela 2 - Composição do biogás.....	40
Tabela 3 - Variação do Poder Calorífico Inferior em relação à composição do biogás.....	62
Tabela 4 - Fatores de emissão de CO ₂ para energia elétrica.....	64
Tabela 5 - Médias mensais das temperaturas de operação dos reatores em 2016 e 2017.....	67
Tabela 6 - Médias mensais de pH do afluente e do efluente aos reatores em 2016 e 2017.....	68
Tabela 7- Médias mensais da DQO do afluente e do efluente aos reatores em 2016 e 2017.....	69
Tabela 8 - Médias mensais de vazão de esgoto afluente dos reatores em 2016 e 2017.....	70
Tabela 9 - Investimentos relativos ao grupo gerador de energia elétrica.....	77
Tabela 10 - Estimativa de fluxo de caixa, fluxo descontado e saldo decorrente.....	79
Quadro 1 - Níveis de tratamento de esgoto sanitário e sua descrição.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDO	Boletim Diário de Operação
C	Carbono
Ca	Cálcio
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CFC	Clorofluorcarbonos
C _{CH4}	Concentração de metano no biogás (%)
CH ₄	Metano
Co	Cobalto
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPE	Consumo ou produção de energia elétrica
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQO _{CH4}	Carga de DQO convertido em metano
E	Energia elétrica total disponibilizada pelo biogás
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
f (T)	Fator de correção para a temperatura operacional do reator
Fe	Ferro
FeCl ₂	Cloreto Ferroso
FeCl ₃	Cloreto Férrico
FeSO ₄	Sulfato de Ferro
FEM	Fator médio de emissão de CO ₂ para energia elétrica
GEE	Gases de Efeito Estufa
h	Hora
H	Hidrogênio
HCFC	Hidroclorofluorcarbonos
HFCs	Hidrofluorcarbonos
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
H ₂ S	Gás Sulfídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
K	Potássio

K	Constante de conversão kcal-kJoules- kwh
K _{DQO}	DQO correspondente a um mol de CH ₄
KOH	Hidróxido de Potássio
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de Potássio
m	Mês
Mg	Magnésio
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio
Mo	Molibdênio
Na	Sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH ₃	Amônia
Ni	Níquel
NMVOC	Compostos Orgânicos Voláteis não Metânicos
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
NTU	Turbidez
O	Oxigênio
O ₃	Ozônio
P	Potência elétrica disponibilizada
P	Fósforo
P	Pressão atmosférica (atm)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCI _d	Poder Calorífico Inferior disponível
PE	Peso Específico
PFCs	Perfluorcarbonos
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGES	Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade
PSA	Adsorção de Pressão Oscilante
PTB	Produção total de biogás
Q	Vazão
Q ^{biogás}	Produção volumétrica de biogás
Q _{CH₄}	Produção volumétrica de metano
R	Constante dos gases
S ₀	Concentração de DQO afluente
S	Concentração de DQO efluente
S	Enxofre
SC	Santa Catarina
Se	Selênio

SES	Sistema de Esgoto Sanitário
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO ₂	Dióxido de enxofre
T	Temperatura operacional do reator
TRC	Tempo de Retorno de Capital
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VPL	Valor Presente Líquido
W	Tungstênio
Y _{abs}	Coefficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO
Zn	Zinco

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDAS

°C	Graus Célsius
ppmv	Partes por milhão em volume
mg/m ³	Miligramma por metro cúbico
L/s	Litros por segundo
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mg/L	Miligramma por litro
uH	Cor verdadeira
R\$	Reais
kWh	Quilowatt-hora
kg	Quilograma
m ³ /d	Metro cúbico por dia
m ³	Metro cúbico
g	Gramas
atm	Atmosfera
mol	Moles
K	Graus Kelvin
°C	Graus Célsius
Nm ³	Normal metro cúbico
kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
kWh/m ³	Quilowatt hora por metro cúbico
kg/Nm ³	Quilo por normal metro cúbico
kcal	Quilocaloria
kJ	QuiloJoule
kW	Quilowatt
m ³ /h	Metro cúbico por hora
t	Tonelada
MWh	Megawatt hora
m ³ /mês	Metro cúbico por mês
kWh/mês	Quilowatt hora por mês

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	ESGOTO SANITÁRIO: CARACTERIZAÇÃO E SISTEMAS DE TRATAMENTO.....	29
2.2	BIODIGESTÃO ANAERÓBICA.....	34
2.2.1	Etapas da biodigestão anaeróbica.....	34
2.2.2	Fatores que afetam a biodigestão anaeróbica.....	36
2.2.3	Estratégias para o aumento da produção de biogás.....	38
2.3	BIOGÁS.....	39
2.4	BIODIGESTORES.....	43
2.5	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS.....	48
2.6	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL DO BRASIL (SIN) E EMISSÃO DE CO ₂	52
2.7	ANÁLISE DE INVESTIMENTO.....	54
3	OBJETIVOS	55
3.1	OBJETIVO GERAL.....	55
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	55
4	METODOLOGIA	56
4.1	CARACTERÍSTICAS DA ETE SANTA LUZIA.....	56
4.2	PARÂMETROS LABORATORIAIS E DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE.....	59
4.3	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	60
4.4	ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	62
4.5	ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CO ₂	63
4.6	ANÁLISE PRELIMINAR DE INVESTIMENTO.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1	CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA NA ETE SANTA LUZIA.....	66
5.2	PRODUÇÃO ESTIMADA DE BIOGÁS.....	69
5.3	GERAÇÃO ESTIMADA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	74
5.4	EMISSÕES ESTIMADAS DE CO ₂	75
5.5	ANÁLISE PRELIMINAR DE INVESTIMENTO.....	77
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e a redução dos recursos naturais para produção de energia são fatores que motivam a busca por fontes alternativas e limpas de geração de eletricidade. Nesse contexto, as fontes de energia renováveis, como a biomassa, ganham importância.

Biomassa é a fração biodegradável de produtos, rejeitos e resíduos de vegetais e animais, bem como a fração de resíduos industriais e municipais urbanos usado como fonte de energia (DIRECTIVA, 2009).

Historicamente, o aproveitamento energético da biomassa foi sempre essencial para a evolução humana, desde a lenha para cozimento de alimentos, proteção e aquecimento, até as práticas modernas de produção silvo-agropecuárias e industriais de transformação e uso de biocombustíveis para geração de calor, força motriz e eletricidade (TOLMASQUIM, 2016).

Atualmente, um grande potencial para a expansão do uso de biomassa se dá por meio de seu emprego na produção de biocombustível, com destaque para o biogás, e sua conversão em energia elétrica. Apesar desse potencial, a biomassa como fonte de energia elétrica corresponde a somente cerca de 8,2% da matriz energética brasileira. Os dados também apontam que a fonte hidráulica corresponde a, aproximadamente, 65,2% de nossa matriz elétrica, a qual apresenta elevados custos de produção e distribuição (EPE, 2018).

Os esgotos sanitários são resíduos que, potencialmente, podem ser empregados como biomassa para a geração de energia. Esses resíduos são capazes de provocar impactos negativos sobre o meio ambiente, à saúde e ao bem estar humano, havendo a necessidade de seu tratamento e destino adequado (MACHADO, 2011).

O processo de biodigestão anaeróbica se constitui em uma das etapas empregadas em sistemas de tratamento de esgotos sanitários, o qual pode ser realizado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Os principais produtos decorrentes dessa etapa de tratamento são o biogás, o digestato (lodo desidratado) e o próprio efluente tratado, podendo, respectivamente, serem usados para geração de energia térmica e elétrica, como biofertilizante orgânico agrícola e água de reuso, entre outras aplicações (CAVINATTO, 1992; CHERNICHARO, 2016).

A ETE Santa Luzia está localizada no município de Criciúma/SC e utiliza os processos de biodigestão anaeróbica e tanques de aeração para o tratamento de esgotos sanitários. Na referida ETE, atualmente, não

existe aproveitamento dos produtos gerados nesse tratamento, sendo o biogás queimado em queimadores *flare*, o digestato encaminhado a aterro sanitário e o efluente tratado lançado no Rio Sangão, o qual é contaminado por resíduos da mineração de carvão, o que compromete a utilização de suas águas. Cabe também destacar que energia elétrica consumida na ETE é proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), cuja geração e distribuição estão envolvidas com a emissão de gases de efeito estufa, que causam impactos negativos ao meio ambiente. Portanto, a realização de estudos do aproveitamento destes resíduos, com destaque para o uso do biogás para a produção de eletricidade, é uma importante demanda socioambiental e econômica.

Partindo destes pressupostos, o presente trabalho avaliou o potencial de geração e utilização de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE Santa Luzia, com vistas à valoração deste produto da biodigestão e consequente redução dos custos operacionais da Estação e diminuição dos impactos ambientais decorrentes do uso de eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional.

A expectativa é de que esta pesquisa possa servir como subsídio para futuros projetos de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica na ETE em estudo, contribuindo para a utilização dessa fonte renovável de energia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na presente Seção estão descritos os pressupostos teóricos básicos pertinentes aos temas abordados na pesquisa, os quais incluem a caracterização dos esgotos sanitários e seus sistemas de tratamento, o processo da biodigestão anaeróbica e biodigestores, produção de energia elétrica a partir do biogás, emissões gases de efeito estufa decorrentes da geração e distribuição de energia elétrica pelo SIN e análise de investimentos. Esses estudos foram de grande relevância, pois serviram de fundamentação para os procedimentos metodológicos previstos nesta pesquisa, bem como para a discussão dos resultados obtidos e conclusões decorrentes.

2.1 ESGOTO SANITÁRIO: CARACTERIZAÇÃO E SISTEMAS DE TRATAMENTO

Os esgotos sanitários podem ser considerados como efluentes oriundos de diferentes fontes (doméstica, comercial e industrial), as quais apresentam características físicas, químicas e biológicas peculiares, conforme descritas na Tabela 1.

Tabela 1- Características físicas, químicas e biológicas de esgoto sanitário e suas fontes.

Característica	Fontes
Propriedades físicas:	
Cor	Esgoto doméstico ou industrial, decomposição natural de material orgânico
Odor	Esgoto em decomposição, esgoto industrial
Sólidos	Abastecimento de água doméstico, esgoto industrial, erosão do solo, vazões externas/infiltração
Temperatura	Esgoto doméstico e industrial
Constituintes químicos:	
Orgânicos	
Carboidratos	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Compostos orgânicos voláteis	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Fenóis	Esgoto industrial
Gorduras, óleos e graxas	Esgotos doméstico, industrial e comercial
Outros	Decomposição natural de materiais orgânicos
Pesticidas	Esgoto agrícola
Poluentes prioritários	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Proteínas	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Surfactantes	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Inorgânicos	
Alcalinidade	Esgoto doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Cloretos	Esgoto doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Enxofre	Abastecimento de água doméstico, esgoto doméstico, comercial e industrial
Fósforo	Esgotos doméstico, comercial e industrial, escoamento superficial natural
Metais pesados	Esgoto industrial
Nitrogênio	Esgotos doméstico e agrícola
pH	Esgotos doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Poluentes prioritários	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Potássio	Esgotos doméstico, comercial e industrial
Gases	
Metano	Decomposição de esgoto doméstico
Oxigênio	Abastecimento de água doméstica, infiltração de água superficial
Sulfeto de hidrogênio	Decomposição de esgoto doméstico
Constituintes biológicos:	
Animais	Cursos de água abertos e estações de tratamento
Helmintos (vermes)	Esgoto doméstico
Plantas	Cursos de água abertos e estações de tratamento
Protoísta	
Arqueobactéria	Esgoto doméstico, infiltração de água superficial e estações de tratamento
Eubactéria	Esgoto doméstico, infiltração de água superficial e estações de tratamento
Vírus	Esgoto doméstico

Fonte: Metcalf e Eddy (2016)

O esgoto sanitário é um agente poluidor ao meio ambiente e propagador de doenças, sendo de extrema importância que o mesmo seja coletado e tratado para que se tenha qualidade em saneamento ambiental (CAVINATTO, 2012). Entretanto, conforme consta no “Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas” publicado pela Agência Nacional

de Águas (ANA), apenas 43,45% dos municípios brasileiros coletam e fazem o tratamento de seu esgoto e, no Estado de Santa Catarina, o percentual é de 24,26% (ANA, 2009).

Dentre os principais impactos e finalidades para implantação do sistema de coleta e tratamento de esgoto sanitário, destacam-se três aspectos básicos: higiênico, social e econômico. O aspecto higiênico tem como objetivo o controle, a prevenção e a erradicação de doenças responsáveis pelos altos índices de mortalidade infantil e mortalidade precoce, que é um dos mais sensíveis índices na saúde pública. Nesse contexto, o sistema promove o tratamento do efluente antes de ser lançado nos corpos receptores naturais de maneira eficaz e segura. Do ponto de vista social, visa-se a eliminação de odores desagradáveis, a melhoria do aspecto visual e estético de ambientes impactados com a deposição inadequada do esgoto, bem como a recuperação das águas naturais e de suas margens para a prática recreativa e de lazer, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população. Sob o aspecto econômico, incluem-se questões como incremento da produtividade geral e, em particular, das produtividades industriais e agropastoril, a proteção dos rebanhos e a maior produtividade dos trabalhadores. As questões ecológicas relativas à fauna e à flora também se refletem na economia, pela preservação dos recursos hídricos e das terras marginais, com vistas a seu pleno uso no desenvolvimento humano (NUVOLARI, 2011).

Os métodos de tratamento de esgoto foram desenvolvidos com o enfoque na saúde pública e nas condições adversas causadas pela deposição do mesmo no meio ambiente. A matéria poluidora encontrada no esgoto pode ser removida por processos físico, químico e biológico, sendo que os mesmos ocorrem em combinações diversas nos sistemas de tratamento (METCALF; EDDY, 2016). O processo físico é aquele que ocorre com a predominância das forças físicas do sistema, conhecidas como procedimentos unitários físicos, que incluem a mistura, peneiração, sedimentação flotação, filtração e adsorção. Nos processos químicos, a remoção dos constituintes é executada por reações químicas ou pelo uso de compostos químicos, que promovem precipitação, transferência de gases, cloração para desinfecção, entre outros. O método biológico de tratamento é realizado pela atividade biológica de microrganismos para remover substâncias orgânicas e coloidais encontradas no esgoto (METCALF; EDDY, 2016).

O tratamento do esgoto sanitário pode ser agrupado em diferentes níveis, os quais estão relacionados com os processos físicos, químicos e biológicos do sistema, conforme descrito no Quadro 1. De modo geral, o

termo primário relaciona-se ao processo físico de tratamento, o secundário aos processos químico e biológico (por exemplo: remoção da matéria orgânica e de alguns nutrientes) e o terciário à combinação dos três (VON SPERLING, 2005).

Quadro 1 – Níveis de tratamento de esgoto sanitário e sua descrição.

Nível de tratamento	Descrição
Preliminar	Remoção de constituintes, como trapos, galhos, flotáveis, areia e graxa, que possam causar problemas operacionais ou de manutenção às operações e aos processos de tratamento e sistemas auxiliares.
Primário	Remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto.
Primário avançado	Remoção melhorada de sólidos suspensos e de matéria orgânica do esgoto. Tipicamente efetuado pela adição de compostos químicos ou pela filtração.
Secundário	Remoção de matéria orgânica biodegradável e sólidos suspensos. A desinfecção é, também, tipicamente incluída na definição de tratamento secundário convencional.
Secundário com remoção de nutrientes	Remoção de compostos orgânicos biodegradáveis, sólidos suspensos e nutrientes (nitrogênio, fósforo ou ambos).
Terciário	Remoção de sólidos suspensos residuais (após tratamento secundário), usualmente por filtros granulares, filtros de pano ou microtelas. A desinfecção é também, um componente típico de tratamento terciário. Remoção de nutrientes é, geralmente, incluído nesta definição.
Avançado	Remoção de materiais suspensos ou dissolvidos, que permanecem após tratamento biológico, quando requerido para aplicações diversas de reuso.

Fonte: Metcalf e Eddy (2016).

A Figura 1 relaciona os diagramas de vazão típicos para o tratamento de esgotos e biossólidos proposto por Metcalf e Eddy (2016).

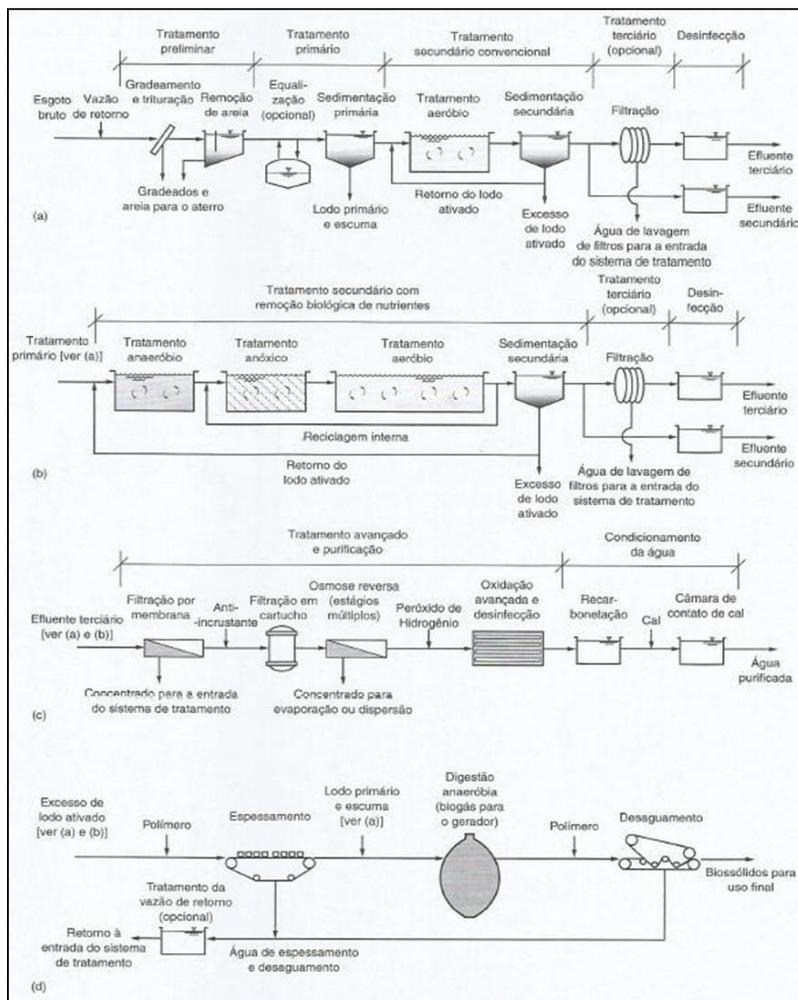


Figura 1- Diagramas de vazão típicos para o tratamento de esgotos e de biossólidos. (a) tratamento biológico convencional; (b) remoção de nutrientes; (c) tratamento avançado após o tratamento convencional ou tratamento com remoção de nutriente; (d) tratamento anaeróbico de lodo oriundo do decantador primário e de excesso de lodo biológico. Fonte: Metcalf e Eddy (2016).

2.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

A biodigestão anaeróbica é um método para decompor a matéria orgânica com a ajuda de uma variedade de microrganismos sob condições anaeróbicas ou livres de oxigênio. Essa tecnologia pode ser utilizada no tratamento de esgotos sanitários em ETEs devido à sua capacidade de reduzir a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) dos fluxos residuais (JAIN et al., 2015). Os produtos finais do processo incluem o biogás, composto, principalmente, por metano (CH_4) e dióxido de carbono CO_2 , e o digestato, o qual é rico em micronutrientes (ex: zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio) e macronutrientes (ex: nitrogênio e fósforo). O biogás pode ser utilizado como biocombustível energético e o digestato, após devidamente tratado de acordo com normas específicas, pode ser empregado na agricultura como biofertilizante e na recuperação de solos degradados, sendo esse uso uma alternativa em substituição à sua disposição final em aterros sanitários (KESKIN et al., 2010).

2.2.1 Etapas da biodigestão anaeróbica

A Figura 2 descreve as principais etapas da produção de biogás pela biodigestão anaeróbica. Na etapa inicial, denominada de hidrólise, compostos orgânicos complexos como proteínas, carboidratos e lipídeos são convertidos em monômeros ou oligômeros solúveis (ex: açúcares, aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa, peptídeos) por meio da ação de enzimas extracelulares liberadas por bactérias hidrolíticas. Os compostos solúveis simples gerados na fase de hidrólise são, então, captados por bactérias fermentativas e sofrem processos fermentativos e oxidativos, gerando uma mistura de acetato, hidrogênio (H_2), dióxido de carbono (CO_2) e produtos intermediários (ex: propionato, butirato, lactato, etanol, etc). A acidogênese é referida como a geração de ácidos graxos voláteis, tais como propionato e butirato. Os ácidos graxos voláteis e o etanol são anaerobicamente oxidados em acetato, H_2 e CO_2 por bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio, em uma etapa denominada de acetogênese. O acetato também pode ser formado partir de H_2 e CO_2 por bactérias acetogênicas oxidantes de hidrogênio, em um processo denominado homoacetogênese. Na etapa final, os metanogênicos acetotróficos transformam o acetato em CH_4 e CO_2 , por meio de um processo denominado de metanogênese acetotrófica. Por sua vez, os metanogênicos hidrogenotrófico promovem a redução do CO_2 à CH_4 , usando H_2 como um doador de elétrons, por meio da metanogênese

hidrogenotrófica. Do total de CH_4 produzido, cerca de 70% tem origem na descarboxilação do acetato, enquanto que o CH_4 restante é produzido, principalmente, a partir da redução de CO_2 (KHANAL, 2008; SURENDRA, 2014).

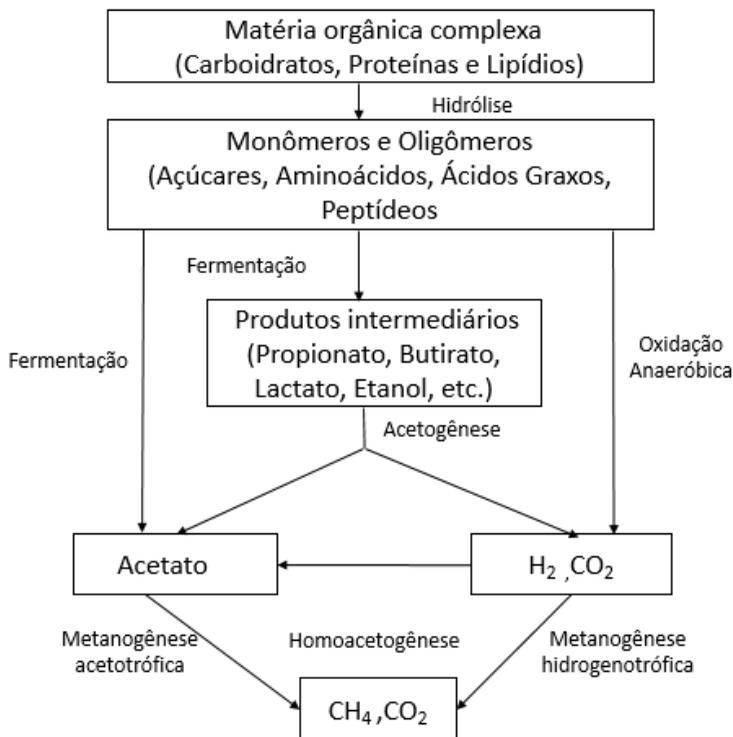


Figura 2- Principais etapas da biodigestão anaeróbica.
Fonte: modificado de Khanal (2008).

É importante destacar que, para as matérias-primas com alto teor de sólidos, a hidrólise se torna limitante no processo, enquanto que para as altamente solúveis, a metanogênese é o passo limitante. Os processos anaeróbios desviam uma pequena quantidade (cerca de 14%) da energia disponível para o crescimento microbiano (10% para bactérias e 4% para os metanogênicos) e a maior parte da energia (86%) é armazenada no produto final como CH_4 (SURENDRA et al., 2014).

2.2.2 Fatores que afetam a biodigestão anaeróbica

Para que a biodigestão anaeróbica se desenvolva é necessário que apresente algumas condições favoráveis para o crescimento da biomassa de microrganismos, bem como para o equilíbrio do sistema. Dentre os fatores mais importantes, se pode destacar o tempo de retenção hidráulica, a temperatura, a alcalinidade, o pH, a concentração de ácidos voláteis, a presença de substâncias inibidoras e de compostos tóxicos, bem como a disponibilidade de nutrientes (METCALF; EDDY, 2016; RUIZ, 1992; ZHANG et al., 2014).

O tempo de retenção hidráulica está relacionado ao tempo médio que o líquido permanece no reator e é dado pela relação entre o volume do biodigestor e a vazão do afluente. Esse tempo se faz necessário para completar a degradação da matéria orgânica que está sendo tratada (EKAMA; WENTZEL, 2008). As reações de hidrólise, fermentação e metanogênese estão relacionadas com o tempo de retenção hidráulica. Uma diminuição ou aumento do mesmo resultará em um aumento ou redução da duração de cada etapa. Caso esse tempo fique menor que o mínimo necessário, as bactérias não terão tempo adequado para a conservação do processo de digestão (METCALF; EDDY, 2016).

A temperatura é um dos mais importantes fatores na seleção das espécies. Não existe maneira de os microrganismos controlarem a sua temperatura interna. Desse modo, a temperatura no interior da célula é parametrizada pela temperatura externa do ambiente. Existem três faixas (intervalos) de temperatura que são associadas ao crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos, quais sejam: faixa psicrófila (entre 4 °C e, aproximadamente, 15 °C), faixa mesófila (entre 20 °C e, aproximadamente, 40 °C) e faixa termófila (entre 45 °C e 70 °C) (CHERNICHARO, 2016). O desenvolvimento microbiano na produção do metano pode ocorrer em uma ampla faixa de temperatura, que pode variar entre 0 °C a 97 °C. Porém, os melhores níveis de temperatura associados à digestão anaeróbica estão na faixa mesofílica de 30 °C a 35 °C e na faixa termofílica de 50 °C a 55 °C. A grande maioria dos digestores anaeróbios é projetada para operar na faixa mesófila, a qual é considerada a melhor, contudo, também é possível a operação dos mesmos em faixa termófila (CHERNICHARO, 2016). Geralmente, um aumento da temperatura tem um efeito positivo sobre a taxa metabólica dos microrganismos e acelera a biodigestão anaeróbica. Em contrapartida, o processo termofílico é mais difícil de controlar e precisa de mais energia para manter a temperatura constante no reator. Essa variação de temperatura pode afetar o crescimento microbiano e, por consequência,

pode reduzir a produção de biogás (DIVYA et al., 2015; KWIETNIEWSKA, 2014). Contudo, os microrganismos da biodigestão anaeróbica são sensíveis a mudanças bruscas de temperaturas, pois isso afeta, quantitativamente, a produção de metano, sendo necessário manter estável a faixa de temperatura de operação do processo (BOWEN et al., 2014).

A alcalinidade, o pH e a concentração de ácidos voláteis são três fatores que estão fortemente relacionados entre si, sendo igualmente importantes nos processos anaeróbicos. O efeito do pH se manifesta diretamente, influenciando nas atividades enzimáticas (ex: alteração de estruturas proteicas das enzimas), e indiretamente, afetando no potencial de toxicidade de determinados compostos (CHERNICHARO, 2016). Para que a fase metanogênese ocorra, é necessário que o pH esteja em valores próximos à neutralidade (6,3 a 7,8) e, caso isso não ocorra, pode haver uma menor taxa de formação de metano ou nenhuma formação. Portanto, é de extrema importância o controle de pH nos reatores anaeróbicos (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). As demais fases do processo, como a acidogênese, são relativamente menos sensíveis ao pH e toleram o intervalo de 4,0 a 8,5. No entanto, o pH para hidrólise pode operar entre 5,5 e 6,5 (KALLISTOVA et al., 2014; KWIETNIEWSKA, 2014). O valor ideal de pH para o tratamento da matéria orgânica é um dos principais motivos para subdividir alguns digestores para isolar as fases acidogênica e metanogênica (ARSLAN et al., 2015). Os ácidos voláteis, que são produzidos na acidogênese, devem ser removidos no processo da metanogênese, pois, caso não ocorra, o processo se torna instável, ocasionando uma perturbação do reator pela alta produção líquida de ácidos. Elementos como ácido graxos de cadeia curta e CO₂ tendem a diminuir o pH, enquanto que íons de nitrogênio amoniacal do processo da degradação de proteínas e o sódio oriundo da degradação de sabão aumentam a alcalinidade e o pH (FORESTI et al., 1999; VERSIANI, 2005). Caso o reator alimente as fases de acidogênese e metanogênese em equilíbrio, o pH no interior do reator anaeróbico precisará manter-se próximo ou pouco acima de 7. Entretanto, tal fato não é válido para esgotos concentrados originários do uso de águas de baixa alcalinidade, como pode ocorrer em regiões litorâneas, nas quais pode ser necessário acrescentar substâncias alcalinas para corrigir o pH (FORESTI et al., 1999).

A presença de substâncias inibidoras (ex: amônia, ácidos, óleos, metais, antibiótico, compostos de metais alcalinos e alcalinos terrosos, detergentes, etc.) é capaz de influenciar na biodigestão anaeróbica e

diminuir ou inibir a formação de biogás. Essas substâncias podem ser provenientes de resíduos, tais como medicamentos, pilhas, baterias, jornais, tintas, enlatados, tecidos e outros materiais (ALVES, 2008; GADELHA, 2005).

A disponibilidade de macronutrientes (ex: C, H, O, N, P, S, K, Na, Ca e Mg), micronutrientes (ex: Fe, Ni, Zn, Cu, Se, Co, Mo, W e Cr) e vitaminas (ex: vitamina B2, vitamina B12) se constitui em outro fator relevante na biodigestão anaeróbica. Os mesmos são necessários para o crescimento dos microrganismos, estando envolvidos na biossíntese de biomoléculas, no metabolismo energético, nas atividades enzimáticas e em mecanismos de defesa contra toxicidade (MAO et al., 2015).

No processo de biodigestão as bactérias são, constantemente, suscetíveis a intoxicações em virtude da presença de altas concentrações de elementos e compostos necessários para sua sobrevivência. Elementos químicos como cobre, cromo, níquel, zinco arsênio e cianeto são classificados como altamente tóxicos. Outras substâncias, como bactericidas e resíduos de antibióticos, se permanecerem presentes no meio reacional, poderão causar a morte das bactérias responsáveis pela biodigestão (CHERNICHARO, 2016; NOGUEIRA, 1992; RUIZ, 1992).

2.2.3 Estratégias para o aumento da produção de biogás

Existem várias alternativas para aumentar a produção de biogás durante o processo de biodigestão anaeróbica, podendo-se destacar a inclusão de aceleradores, tais como biomassa verde, aditivos biológicos e *aditivos inorgânicos* (MAO et al., 2015).

A biomassa verde compreende um conjunto de vegetação constituído por diferentes plantas, resíduos de plantas (ex: resíduos da colheita de culturas de arroz, milho, trigo, etc), ervas daninhas e materiais ensilados, os quais podem agir como estimulantes metabólicos para os microrganismos atuarem nos reatores anaeróbios, produzindo maior quantidade de biogás (MAO et al., 2015).

Os aditivos biológicos incluem fungos, consórcios microbianos e enzimas. Os fungos são usados, principalmente, no pré tratamento de biomassa lignocelulósica que, por ação enzimática, são capazes de degradar a matéria lignocelulósica, facilitando as reações subsequentes da biodigestão. Os consórcios microbianos são formados por um conjunto de leveduras e bactérias celulolíticas, lodo tratado termicamente, *Clostridium thermocellum* e uma mistura de fungos e microrganismos de compostagem. Eles aumentam a disponibilidade de celulose e hemicelulose e, portanto, a digestibilidade do substrato, com consequente

aumento na produção de biogás. As enzimas (ex: celulases, hemiceluloses, proteases, lipases e quinases) são obtidas de diferentes microrganismos e plantas e podem atuar como catalisadores na degradação da matéria orgânica, contribuindo para o crescimento e atividade ótimos dos vários tipos de microrganismos envolvidos na biodigestão anaeróbica. As mesmas podem substituir os catalisadores inorgânicos, no entanto, apresentam um custo elevadíssimo, tornando inviável sua aplicação em grande escala (MAO et al., 2015).

Os aditivos inorgânicos compreendem os reagentes químicos alcalinos (ex: NaOH, KOH, $Mg(OH)_2$ e $Ca(OH)_2$) ácidos (ex: H_2SO_4 , ácido hidrolórico, ácido fosfórico, ácido maleico, ácido fórmico e ácido acético), oxidativos (ex: H_2O_2 , O_3) e sais inorgânicos (ex: $FeCl_3$, $FeCl_2$ e $FeSO_4$), bem como macronutrientes, micronutrientes e vitaminas. Os reagentes alcalinos, ácidos, oxidativos e sais inorgânicos são, usualmente, utilizados no pré-tratamento de substrato, sendo capazes de alterar as propriedades da matéria-prima, provocando aumento de sua área superficial, degradação, remoção ou dissolução da lignina e da hemicelulose, quebras de ligações e interações químicas, tornando a biomassa lignocelulósica mais biodegradável (MAO et al., 2015). Os macronutrientes, micronutrientes e vitaminas são necessários para o metabolismo e crescimento dos microrganismos, sendo considerados estimulantes e os mais econômicos e ambientalmente viáveis aceleradores para o aumento da produção de biogás. O seu efeito estimulante é significativo, principalmente, na digestão anaeróbica de excrementos de animais, resíduos vegetais e resíduos urbanos.

2.3 BIOGÁS

O biogás é considerado uma fonte de energia renovável e excelente alternativa de substituição aos combustíveis fósseis para a geração de calor, força motriz e eletricidade, podendo ser utilizado em equipamentos como fogões, queimadores, motores, geradores, iluminação, aquecedores residenciais e industriais, refrigeradores, estufas, secadores de grãos, incubadoras, entre outros (AGOSTINI et al., 2015; GUNASEELAN, 1997; IPCC, 2007). Por ser considerado uma fonte estratégica de energia, o mesmo se torna um agente importante no aumento da geração de energia elétrica distribuída no país, baseado em fontes limpas e renováveis, sendo considerada uma fonte estocável de energia, utilizada conforme uso e demanda necessária (NOVAGRID, 2017).

O biogás pode ser produzido a partir da fermentação anaeróbica de matéria orgânica de quase todos os tipos de materiais biológicos decorrentes dos setores agrícolas primários e também dos resíduos orgânicos industriais e domésticos. O mesmo é composto, principalmente, por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), acompanhado em menores concentrações de vapor d'água, nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), hidrocarbonetos, siloxanos entre outros (Tabela 2). Sua composição pode variar de acordo com o tipo de biodigestor, substrato orgânico e tempo de retenção hidráulica, entre outros fatores (ANGELIDAKI et al., 2018; MONTE, 2010; SASSE; POLPRASERT, 1998).

Tabela 2- Composição do biogás.

Componente	Concentrações
CH_4	50% a 70%
CO_2	30% a 50%
Vapor d'água	5% 10 %
N_2	0% a 3%
O_2	0% a 1%
H_2S	0-10.000 ppmv
Hidrocarbonetos	0-200 mg/m^3
Siloxanos	0-41 mg/m^3

Fonte: Angelidaki e colaboradores (2018).

Com exceção do metano (CH_4), todos os outros gases contidos no biogás são indesejados e considerados contaminantes. Tem-se proposto que, quanto maior o conteúdo de CO_2 ou N_2 , menor o conteúdo energético do metano. Os gases H_2S e NH_3 são tóxicos e extremamente corrosivos, sendo capazes de danificar os componentes de motores geradores com emissão de SO_2 durante a combustão do biogás que é um poluente atmosférico associado à formação de chuva ácida. Além disso, a presença de siloxanos no biogás, mesmo em concentrações menores, é associado à formação de partículas sólidas de óxidos decorrentes da

combustão, os quais se precipitam e se depositam na superfície de cilindros, velas e válvulas, causando efeitos corrosivos e mau funcionamento do sistema (ANGELIDAKI et al., 2018).

Nesse contexto, atualmente, existem diferentes tratamentos visando remover os compostos indesejáveis do biogás, expandindo sua gama de aplicações. O primeiro tratamento está relacionado com a “limpeza do biogás” e inclui a remoção compostos nocivos e/ou tóxicos, tais como H_2S , silício, compostos orgânicos voláteis, siloxanos, CO e NH_3 . O segundo tratamento é chamado de "*biogas upgrading*" e visa aumentar o poder calorífico do biogás e, assim, ter uma maior eficiência na sua conversão energética. Caso o biogás seja purificado de acordo com especificações similares as do gás natural, o produto final é chamado biometano (ANGELIDAKI et al., 2018).

Dentre as tecnologias "*biogas upgrading*" encontram-se as físico-químicas e as biológicas. As físico-químicas compreendem o método de absorção física, usando sistema de purificação de água ou solventes orgânicos, o método de absorção química, usando, por exemplo, soluções de amina, adsorção de pressão oscilante (PSA), membrana de separação, separação criogênica e hidrogenação química. Por sua vez, as tecnologias biológicas compreendem os métodos quimiotróficos, métodos fotoautotróficos, processos fermentativos e métodos eletroquímicos microbianos (ANGELIDAKI et al., 2018).

O método de absorção física usando sistema de purificação com água consiste na separação de CO_2 e H_2S do biogás em razão da maior solubilidade dos mesmos em água em comparação com CH_4 . Após a secagem, o CH_4 pode atingir até 99% de pureza. O método de absorção física usando solventes orgânicos baseia-se no mesmo princípio que a lavagem com água, no entanto, a absorção de CO_2 e H_2S é realizada pelo uso de solvente orgânico, normalmente, misturas de metanol e éteres dimetílicos de polietilenoglicol. A vantagem do uso destes solventes é a maior solubilidade do CO_2 . nos mesmos, quando comparado ao uso de água. No entanto, os solventes orgânicos são difíceis de regenerar e isso constitui um grande obstáculo do processo. A concentração final de CH_4 por meio dessa tecnologia pode chegar a 98% (ANGELIDAKI et al., 2018).

No método de absorção química usando aminas, são empregadas soluções aquosas de mono, di ou tri-etanolamina para absorção das moléculas de CO_2 contidas no biogás. Uma das vantagens desta tecnologia é que o H_2S também pode ser completamente absorvido.

O sistema de adsorção de pressão oscilante (PSA) opera o processo de separação de CO₂ do CH₄ por meio de colunas/dispositivos com adsorventes (geralmente carvão ativado), nas quais as pressões de trabalho variam no curso do processo. Nas altas pressões o CO₂ é adsorvido pelo material, que é posteriormente regenerado por uma diminuição progressiva da pressão aplicada (ANGELIDAKI et al., 2018).

A tecnologia de separação por membranas é uma alternativa à purificação do biogás pela absorção tradicional. O princípio dessa tecnologia depende das propriedades de permeabilidade das membranas, permitindo a separação dos componentes do biogás. Dependendo do meio de separação, o processo pode ser realizado a seco (separação gás/gás) ou úmido (separação gás/líquido). A taxa de permeação dessas membranas está relacionada aos coeficientes de absorção dos gases e do material de construção da membrana que, por sua vez, afeta sua seletividade e eficiência (ANGELIDAKI et al., 2018).

A separação criogênica do biogás se fundamenta no princípio de que o CO₂, o H₂S e todos os outros contaminantes do biogás podem ser separados do CH₄, uma vez que cada contaminante se liquefaz em um intervalo de pressão-temperatura diferente. Esse processo de separação opera a baixas temperaturas e a altas pressões. Esses requisitos operacionais são mantidos, usando uma série linear de compressores e trocadores de calor (ANGELIDAKI et al., 2018).

Em relação ao processo de hidrogenação química, o mesmo consiste na produção de metano a partir da reação de redução de CO₂ pelo H₂, utilizando-se catalisadores, sendo níquel e rutênio os mais empregados para este fim. Devido à alta seletividade, a conversão completa pode ser praticamente alcançada (ANGELIDAKI et al., 2018.)

As tecnologias biológicas de purificação do biogás empregando métodos quimiotróficos se baseiam na ação de microrganismos metanogênicos hidrogenotróficos que podem utilizar H₂ para converter CO₂ em CH₄. Por sua vez, os métodos fotoautotróficos constituem em processos biotecnológicos alternativos de eliminação do CO₂ para obter um gás rico em CH₄, sendo catalisado por organismos fototróficos em fotobiorreatores. O biogás é injetado diretamente nos fotobiorreatores em uma coluna de absorção, onde o fluxo é recirculado, subsequentemente, os microrganismos fotoautotróficos, como por exemplo cianobactérias procarióticas ou microalgas eucarióticas, podem absorver CO₂, utilizando irradiação solar, água e nutrientes para produzir biomassa, oxigênio e calor (ANGELIDAKI et al., 2018).

Na purificação do biogás por processos alternativos de fermentação, microrganismos (ex: *Acetobacterium woodii*,

Butyribacterium methylophilum, *Clostridium dispersologenes*) convertem CO_2 e H_2 em produtos líquidos de valor agregado, tais como acetato, etanol, butirato e butanol, os quais podem ser utilizados como combustíveis ou seus precursores (ANGELIDAKI et al., 2018).

Por fim, a purificação do biogás por meio de métodos eletroquímicos microbianos ocorre em uma célula de eletrólise microbiana, onde elétrons liberados pela oxidação de compostos orgânicos sob a ação de bactérias no ânodo podem combinar com prótons para gerar hidrogênio na câmara catódica na qual acontece a reação eletroquímica e, conseqüentemente, o hidrogênio formado no cátodo pode ser usado para produzir metano a partir da reação com CO_2 (ANGELIDAKI et al., 2018).

2.4 BIODIGESTORES

Existem diferentes tecnologias de produção de biogás onde são empregados biodigestores. O biodigestor é um dispositivo de engenharia, constituído, basicamente, de uma câmara fechada na qual a biomassa é fermentada anaerobicamente e o biogás resultante é canalizado para ser empregado para os mais diversos fins.

Esses sistemas digestores podem ser classificados com base em diferentes parâmetros, tais como o modo de alimentação (sistema de batelada ou contínuo), teor de umidade do substrato (digestão úmida ou seca), temperatura em que o sistema é mantido (mesofílica ou termofílica). O sistema de digestão também pode ser descrito de acordo com sua escala, podendo ser pequena, como as unidades familiares, digestores comunitários ou industriais de média e larga escala (BARREIRA, 2011; ROOPNARAIN; ADELEKE, 2017).

Vários modelos de biodigestores podem ser empregados, os quais se diferem pelas características construtivas e operacionais, podendo ser mais simples ou mais sofisticados. Os modelos de biodigestores mais simples encontrados na literatura são o indiano, o chinês, o canadense e tipo batelada (CARVALHO; CÉSAR; SANTOS, 2016).

O biodigestor modelo indiano tem como principal característica a de possuir uma campânula, também denominada gasômetro, a qual pode ser mergulhada na biomassa em fermentação. Esse modelo, geralmente, apresenta uma parede central que tem como objetivo dividir o tanque onde ocorre o processo de fermentação em duas câmaras a fim de que o esgoto circule pelo interior da câmara de fermentação (TARRENTO,

2006). A Figura 3 apresenta um biodigestor modelo indiano descrito por Fonseca e colaboradores (2009).

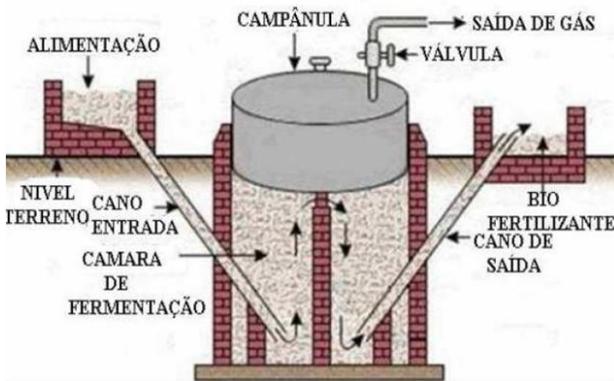


Figura 3 - Biodigestor modelo Indiano. Fonte: Fonseca e colaboradores (2009).

O biodigestor modelo chinês é constituído por uma câmara cilíndrica em alvenaria, onde acontece a fermentação, e possui gasômetro fixo, impermeável e em forma de abóboda, que é destinado ao armazenamento do biogás. Seu funcionamento é baseado no princípio de uma prensa hidráulica, tendo crescente aumento de pressão em seu núcleo devido ao acúmulo de biogás, resultando no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido oposto quando ocorre a descompressão (JORGE; OMENA, 2012). A Figura 4 apresenta um biodigestor modelo chinês representado por Fonseca e colaboradores (2009).

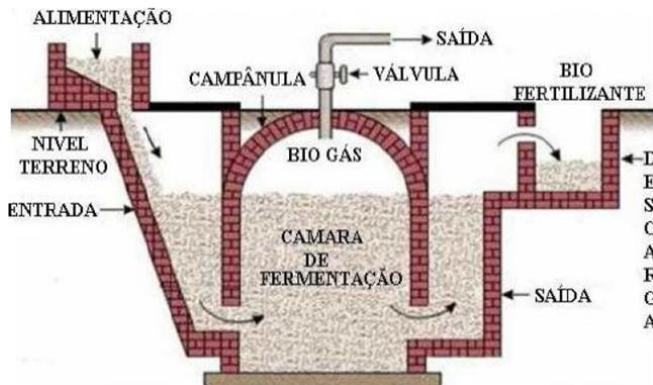


Figura 4 - Biodigestor modelo chinês. Fonte: Fonseca e colaboradores (2009).

O biodigestor modelo canadense, ou também denominado de biodigestor de fluxo tubular (Figura 5), é de construção simples, possuindo uma câmara de biodigestão encravada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico (OLIVER, 2008). Esse modelo se destaca por ser do tipo horizontal, exibindo uma caixa de carga feita em alvenaria e com largura maior que a profundidade, havendo maior área de exposição ao sol, que favorece maior produção de biogás e menor risco de entupimento. Esse modelo é bastante difundido no Brasil, sendo largamente utilizado em propriedades rurais e em projetos agroindustriais (CASTANHO; HARRUDA, 2008; OLIVER, 2008).

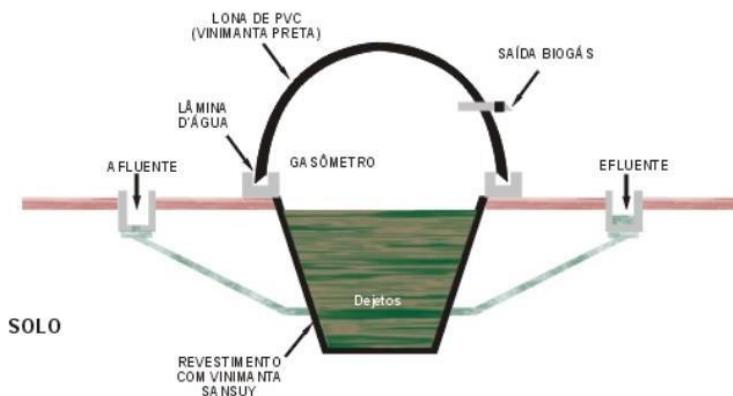


Figura 5 - Biodigestor modelo Canadense. Fonte: Oliver (2008).

O biodigestor do tipo batelada é caracterizado como descontínuo, pois fornece biogás por um período determinado, sendo interrompido para a retirada do material fermentado e a introdução de nova carga de material orgânico a ser biodigerido. Esse tipo de biodigestor pode ser construído em alvenaria, concreto ou aço. A matéria orgânica a ser digerida é colocada na câmara de digestão que, então, é fechada hermeticamente, mantendo-se apenas a saída para o gás. O biogás produzido pode ser armazenado em tanques ou gasômetros adjacentes para utilização futura (OLIVER, 2008). A Figura 6 apresenta o biodigestor do tipo batelada, conforme proposto por Silva (2017).

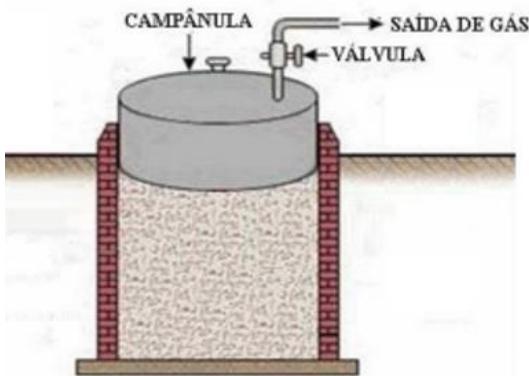


Figura 6- Biodigestor do tipo batelada. Fonte: Silva (2017).

Outra tecnologia disponível para a produção de biogás, a qual é comumente utilizada no tratamento biológico de esgotos pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica, é o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

O reator UASB foi desenvolvido por Gatzke Lettinga e colaboradores por volta de 1970, na Universidade de Agricultura de Wageningen, na Holanda (LETTINGA et al., 1980). O seu processo de funcionamento consiste de um fluxo ascendente de esgoto que flui através de um leito de lodo denso de elevada atividade. Os sólidos no reator oscilam de muito densos e com partículas granuladas de alta capacidade de sedimentação, próximas ao fundo (leito de lodo), até um lodo mais disperso e menos denso, próximo na extremidade superior do reator (manta de lodo) (CHERNICHARO, 2016).

Nesse reator o equilíbrio da matéria orgânica acontece em todas as fases de reação (leito e manta de lodo), fazendo com que a mistura do

sistema ocorra por meio do fluxo ascensional do esgoto e das bolhas de gás. O esgoto adentra pelo fundo e o efluente sai do reator por um decantador interno que se situa na parte superior do reator. A separação de gases e sólidos se dá por meio de um dispositivo situado abaixo do decantador que, por sua vez, garante as condições para a sedimentação das partículas que se desgarram da manta de lodo, fazendo com que essas voltem à câmara de digestão ao invés de serem lançadas para fora do sistema. Contudo, parte das partículas mais leves é arrastada com o efluente. O tempo médio de permanência dos sólidos no reator é alto para manter o crescimento de uma massa densa de microrganismos formadores de metano, apesar do baixo tempo de detenção hidráulica (CHERNICHARO, 2016).

Esse processo tem a capacidade de desenvolver uma biomassa de elevada atividade, que pode se apresentar na forma de flocos ou grânulos de 1mm a 5 mm de diâmetro. O cultivo de um lodo anaeróbio de excelente qualidade ocorre em um processo cauteloso de partida do sistema, com a seleção da biomassa, permitindo que o lodo de má qualidade seja eliminado para fora do sistema ao mesmo tempo que o lodo de boa qualidade é retido. A habilidade do processo é a de promover a separação de gases e sólidos por meio de um aparato situado na parte superior do reator, cujo objetivo é separar os gases contidos na mistura líquida de tal maneira que uma região propícia à sedimentação seja criada na extremidade superior do reator (CHERNICHARO, 2016).

A Figura 7 apresenta um esquema representativo de um reator UASB, conforme descrito por Chernicharo (2016).

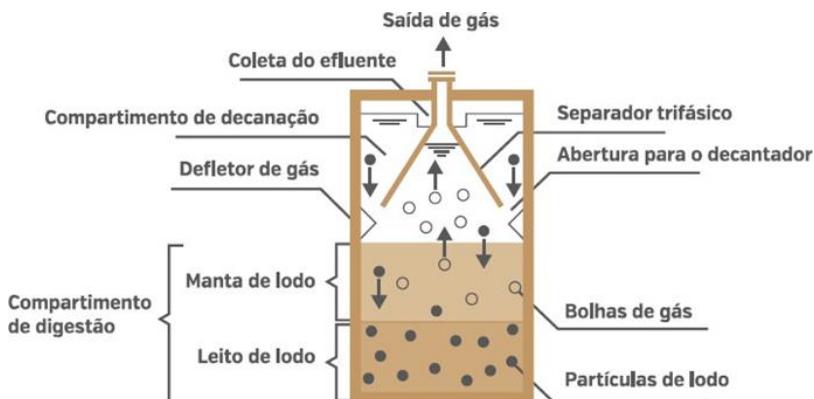


Figura 7 - Reator UASB. Fonte: Chernicharo (2016).

Os projetos de reatores anaeróbios UASB são bastante simples e não requerem qualquer equipamento sofisticado para a operação. Dentre as suas vantagens, se destacam a baixa demanda por área, baixo custo de implantação e operação, baixa produção de lodo, baixo consumo energético e remoção de matéria orgânica na ordem de 70%. Entretanto, o mesmo tem desvantagens, como possibilidade de emanação de maus odores, baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas e necessidade de uma etapa de pós tratamento (CHERNICHARO, 2016).

2.5 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

Conforme já descrito, uma das aplicações do biogás é seu uso para geração de energia elétrica. Para isso, há a transformação da energia química contida nas moléculas constituintes do biogás em energia mecânica por um processo de combustão controlada. A energia mecânica, por sua vez, ativa um gerador que a converte em energia elétrica. Nos processos de combustão controlada, destacam-se as seguintes tecnologias disponíveis comercialmente: turbinas a gás, microturbinas e grupos geradores de combustão interna (COELHO et al., 2006).

As turbinas a gás são equipamentos térmicos que convertem a energia de um combustível em potência. As mesmas são constituídas por um compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina em si (MONTE, 2010). O compressor aumenta a pressão do ar admitido para a combustão. A câmara de combustão é o local onde ocorre a combustão da mistura ar-combustível. A turbina é um equipamento que converte a energia liberada pela combustão em potência mecânica, sendo constituída por um rotor de pás ligadas a um eixo girante sobre um conjunto de mancais. No compressor acontece a elevação da pressão do ar e da temperatura que, após, é injetado na câmara de combustão, suprimindo oxigênio para a queima do combustível (biogás). Os gases de exaustão resultante da queima são expandidos na turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. Após, o eixo da turbina é conectado ao compressor e ao gerador elétrico, para que a potência extraída do eixo da turbina acione o compressor e o gerador de eletricidade (VAN WYLEN et al., 1995). A Figura 8 apresenta a estrutura de uma turbina a gás, conforme proposto por Van Wylen e colaboradores (1995).

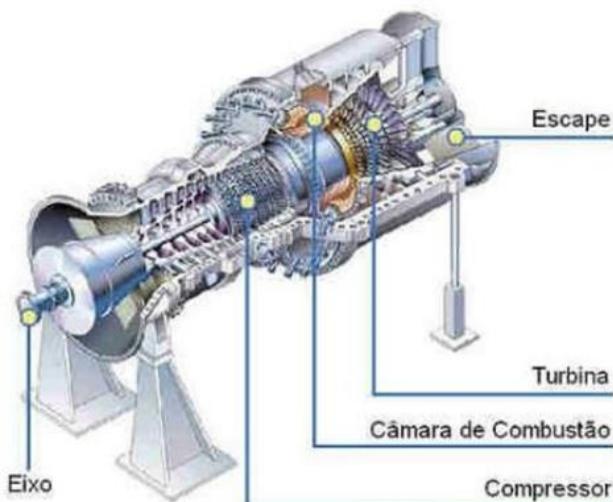


Figura 8 - Estrutura de uma turbina a gás. Fonte: Van Wylen e colaboradores (1995).

Nas microturbinas, o compressor encaminha o ar para a câmara de combustão, na qual se forma uma mistura de ar comprimido e combustível que alimenta uma combustão contínua. Os gases aquecidos e em alta pressão são expandidos através das pás de uma turbina, fazendo com que gire em alta velocidade. Como a turbina de expansão é montada no mesmo eixo do compressor e do gerador elétrico, quando o ciclo se completa a turbina é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico. O pequeno porte desses sistemas aumenta a flexibilidade operacional, possibilitando a geração de energia em pequenas localidades, o que amplia o espectro de localidades com potencial para a recuperação de biogás (COSTA, 2006; CORTEZ et al., 2008; PILAVACHI, 2002). Na Figura 9 está demonstrada a estrutura de uma microturbina a gás, conforme proposto por Pecora (2006).

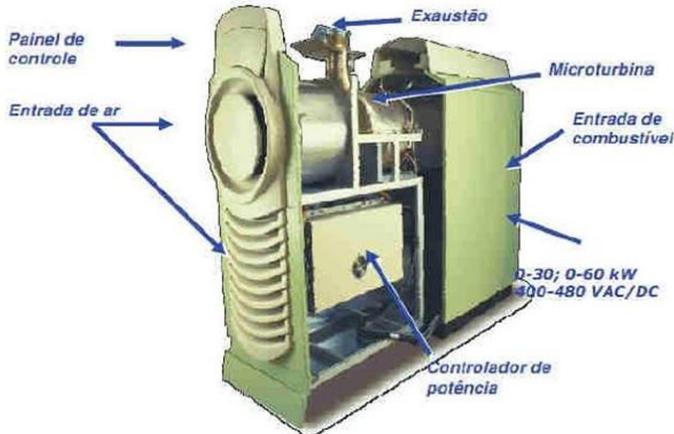


Figura 9- Estrutura de uma microturbina. Pecora (2006).

Nos motores de combustão interna a queima do biogás acontece no interior da câmara de combustão, gerando uma reação exotérmica, com a formação de gases a elevada temperatura e pressão. A expansão desses gases possibilita a movimentação dos pistões, ocorrendo, então, a conversão de pressão em movimento rotacional atuando no gerador de energia. Esses motores são preparados para utilizar diferentes tipos de combustíveis líquidos ou gasosos, tais como óleo diesel, gasolina, gás natural, biogás e ainda uma mistura deles. Esses equipamentos proporcionam uma partida rápida, operação estável, alto potencial de recuperação de calor e são comumente confiáveis (USEPA, 2003). Possuem custo mais baixo em relação às turbinas e se encontram disponíveis em tamanhos menores, mas estão mais sujeitos à corrosão causada pelas espécies ácidas presentes no biogás. Estudos mostram que a eficiência dos mesmos varia de acordo com o teor de metano no biogás e que os motores mais atuais já vêm preparados para queimar o biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico (SALOMON, 2007; U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2003).

No mercado existem, basicamente, dois tipos de motores de combustão interna: os de ciclo Otto e os de ciclo Diesel. Nos motores de ciclo Otto, a combustão da mistura ar-combustível é provocada por uma centelha produzida por uma vela de ignição. Nos motores de ciclo Diesel, a combustão é decorrente da compressão da mistura, onde o combustível entra em combustão espontânea em decorrência do aumento da pressão e da temperatura interior do cilindro. Motores de ciclo Otto, que são

desenvolvidos para operar com combustíveis derivados do petróleo, são mais suscetíveis ao H_2S do que os motores de ciclo Diesel, os quais são mais robustos e preparados para suportar maiores concentrações de enxofre (LORA; VENTURINI, 2012). Para viabilizar a utilização de biogás em motores, é necessário reduzir a concentração do H_2S que é corrosivo, sendo que utilização de filtros pode ser empregado para este fim. Tem-se proposto que a percentagem de H_2S presente no biogás não deve exceder a 0,05 % em volume (BARRETO; ALMEIDA; BELCHIOR, 2017)

A Figura 10 apresenta um motor de combustão interna operando num sistema de cogeração, conforme descrito por França Junior (2006).



Figura 10- Motor de combustão interna operando num sistema de cogeração.
Fonte: França Junior (2006).

A produção de energia elétrica a partir do biogás apresenta diversos potenciais e vantagens, dentre as quais se destacam a geração descentralizada e próxima da fonte consumidora, probabilidade de receita adicional em virtude da disponibilidade de geração de energia e comercialização com a companhia elétrica, redução no consumo de energia pelo empreendimento gerador, possível uso de processos para a cogeração de energia (calor e eletricidade), redução das emissões de

gases de efeito estufa para a atmosfera, gerando créditos de carbono (COELHO et al., 2006).

2.6 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL DO BRASIL (SIN) E EMISSÃO DE CO₂

O Brasil é integrante da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), a qual tem como objetivo principal reduzir a temperatura global na atmosfera em um nível que impeça uma interferência humana perigosa no sistema climático. Dentre os compromissos assumidos pelo país destacam-se pesquisa, promoção, desenvolvimento e aumento do uso de formas novas e renováveis de energia, de tecnologias de sequestro de dióxido de carbono e de tecnologias ambientalmente saudáveis avançadas e inovadoras. Também inclui a limitação e/ou redução das emissões de metano por meio da recuperação e do uso na gestão de resíduos, bem como na produção, transporte e distribuição de energia (BRASIL, 2016).

O Brasil também aprovou a Lei 12.187, de 29 de dezembro de 2009, a qual institui a Política Nacional de Mudanças Climáticas. De acordo com o artigo 12 da referida lei, o país adotará, como compromisso nacional voluntário, ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, com vistas em reduzir suas emissões entre 36,1% e 38,9% até 2020 (BRASIL, 2009).

Outro importante compromisso assumido pelo Brasil como integrante da CQNUMC, é o de elaborar, atualizar e prover à Conferência das Partes inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa (GEE) não controlados pelo Protocolo de Montreal, os quais compreendem os gases clorofluorcarbonos (CFC) e os hidroclorofluorcarbonos (HCFC). As emissões não controladas pelo referido Protocolo incluem o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆), bem como os gases de efeito estufa indireto, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO) e outros compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC). Nesse contexto, foi publicado em 2016 o 3º Inventário Nacional dessas emissões referentes ao período de 1990 a 2010, cobrindo os seguintes setores: Energia; Processos Industriais; Uso de Solventes e Outros Produtos; Agropecuária; Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas; e Tratamento de Resíduos (BRASIL, 2016).

Para o setor de energia são estimadas todas as emissões antrópicas devido à produção, à transformação e ao consumo de energia, incluindo as emissões resultantes da queima de combustíveis e as resultantes de fugas na cadeia de produção, transformação, distribuição e consumo. Em relação às resultantes da queima, são incluídas as emissões de CO₂, CH₄, N₂O, CO, NO_x e NMVOC oriundas da oxidação do carbono contido nos combustíveis fósseis durante a sua queima para geração de outras formas de energia, como eletricidade, ou no consumo final. Cabe destacar que, no caso dos combustíveis de biomassa, as emissões de CO₂ são informadas, porém não contabilizadas no total de emissões do setor energético. Por sua vez, os combustíveis de origem renovável não geram emissões de CO₂ líquidas e as emissões associadas à parcela não renovável são incluídas no setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. Em relação às emissões fugitivas, são incluídas as emissões de gases de efeito estufa provenientes do processo de mineração e beneficiamento do carvão mineral, além das emissões devido ao processo de extração, transporte e processamento de petróleo e gás natural, as quais compreendem o CO₂, CH₄ e N₂O. As emissões de CO₂ por queima no *flare* são também incluídas em emissões fugitivas por estarem associadas a uma perda e não ao consumo útil do combustível (BRASIL, 2016).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações divulga, mensalmente, os Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN), os quais podem ser utilizados para fins de Inventários. Esses fatores de emissão de CO₂ para energia elétrica têm como objetivo estimar a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica determinada. Eles calculam a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas do SIN que estão gerando energia elétrica. Assim, as fontes consumidoras de energia elétrica do SIN podem estimar o quanto de CO₂ é emitido pelo seu consumo, multiplicando a sua energia elétrica consumida por esse fator de emissão (MCTIC, 2018).

Dessa forma, essa ferramenta pode ser utilizada para estimar as emissões mensais e anuais produzidas de CO₂ em decorrência do consumo de energia elétrica do SIN pela ETE Santa Luzia, bem como a emissão evitada de CO₂ em função do uso da energia elétrica produzida a partir do biogás gerado na ETE em estudo.

2.7 ANÁLISE DE INVESTIMENTO

A análise de investimento ou de capital para fins de avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás em ETE também é um fator importante e que deve ser levado em consideração na definição e implantação de tecnologias para este fim.

Esta análise pode ser realizada, utilizando diferentes técnicas e ferramentas para avaliar a rentabilidade e analisar a viabilidade econômica das alternativas tecnológicas selecionadas (FILHO; KOPITTKKE, 2010; SAMANEZ, 2009). A análise de investimento pode ser utilizada pelo investidor no auxílio da tomada de decisão, principalmente, na disposição de investir dinheiro ou não no negócio (PELISSARI; GONZALEZ; VANALLE, 2011).

A análise de investimentos de capital relacionada à projeção das condições futuras econômicas pode ser efetuada por meio das estimativas do Valor Presente Líquido (VPL) e do Tempo de Retorno de Capital (TRC) ou *Payback* (SAMANEZ, 2009).

O VPL é calculado a partir da diferença dos custos e remunerações provenientes do projeto, onde os valores do fluxo de caixa são retificados para o valor presente, a partir do abatimento de uma determinada taxa de juros (NAKABAYASHI, 2015). O mesmo se caracteriza como um método confiável de avaliação de investimento por analisar, exclusivamente, os fluxos de caixa e o custo de propriedade de capital (BREALEY; MYERS; ALLEN, 2013).

O Tempo de Retorno de Capital (TRC) ou *Payback* é o período necessário para que o capital investido seja recuperado. Neste cálculo se faz o somatório da receita líquida acumulada até o valor zero, contabilizando o período gasto para recuperar o investimento inicial (GOMES, 2005). Para o investidor, seja ele pessoa física ou jurídica, essa informação é importante, pois permite a avaliação do risco através do tempo que irá delongar na recuperação do capital investido no projeto (WEISE, 2013).

O TRC consiste em calcular valores de VPL para valores crescentes de número de períodos e verificar qual valor “ $n = TRC$ ” anula o VPL. É importante mencionar que, quanto menor for o tempo de retorno de um investimento, menor será o risco do projeto. O TRC mostra se o retorno do capital investido ocorre dentro do prazo planejado pela empresa/investidor de cada organização (LIMA et al., 2013).

3 OBJETIVOS

Nesta Seção estão descritos o objetivo geral e específicos propostos neste trabalho.

3.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na estação de tratamento de esgoto (ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC) e realizar estudos preliminares de emissão de CO₂ envolvidos desse processo e de análise de econômica. Estes estudos visam subsidiar futuros projetos de aproveitamento dessa fonte alternativa de energia na ETE, reduzir os seus custos operacionais e contribuir para a utilização de fontes energéticas alternativas e amenização dos impactos ambientais negativos associados a resíduos sanitários.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos compreendem:

- . Obter melhor conhecimento do estado da arte dos temas relacionados à temática da pesquisa;
- . Caracterizar o processo de tratamento de esgotos na ETE Santa Luzia;
- . Estimar a produção de biogás e bioeletricidade na ETE Santa Luzia;
- . Estimar a emissão de CO₂ evitada com o aproveitamento energético do biogás produzido na ETE Santa Luzia;
- . Realizar estudos preliminares da estimativa do capital a ser investido e do Tempo de Retorno de Capital (*Payback*) decorrente do aproveitamento energético do biogás na ETE;
- . Subsidiar futuros projetos de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica na ETE em estudo.

4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos foram executados procedimentos metodológicos que incluíram a caracterização da ETE Santa Luzia, aquisição de dados mensais de parâmetros laboratoriais e de consumo de energia elétrica da ETE nos anos de 2016 e 2017. Com base nesses parâmetros, foram realizados os cálculos da estimativa de produção de biogás, eletricidade, emissão de CO₂ e de viabilidade econômica. A seguir são descritas as diferentes etapas executadas.

4.1 CARACTERÍSTICAS DA ETE SANTA LUZIA

A pesquisa foi realizada na Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETE) denominada ETE Santa Luzia, a qual está localizada na Rodovia Antônio Just, km 1300, Bairro Universitário, município de Criciúma, estado de Santa Catarina. Sua administração é gerida pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). A Estação iniciou sua operação no ano de 2010 e, atualmente, atende a uma população de, aproximadamente, 80.500 habitantes, com capacidade para processar uma vazão média de 182 l/s numa área de, aproximadamente, 80.000 m².

A rede coletora do Sistema de Esgoto Sanitário (SES) de Criciúma é constituída por oito sub-bacias sanitárias, dois interceptores, três elevatórias e quatro emissários. Atualmente, possui cerca de 132.000 m de rede coletora de esgoto com um total de, aproximadamente, 6.700 ligações prediais instaladas. O esgoto é transportado por ramais prediais das edificações para os coletores secundários e, desses, para os coletores-tronco e logo após para o interceptor, que é a tubulação que chega nas elevatórias. Dessas, seguem pelos emissários (recalque ou gravidade) até a ETE (CASAN, 2012).

A estrutura física da ETE Santa Luzia (Figura 11) é constituída pela própria estação de tratamento de esgoto, por um laboratório de análises e uma oficina mecânica.



Figura 11 – Estrutura física da ETE Santa Luzia. Fonte: do Autor

O sequencial de operação da ETE (Figura 12) se inicia com o tratamento preliminar, que corresponde à fase inicial do processo e tem por finalidade promover o pré-tratamento do esgoto bruto, retendo materiais flutuantes e gorduras, removendo sólidos grosseiros e areia a fim de adequar o esgoto às condições necessárias para a posterior etapa, que corresponde ao tratamento biológico. Outra finalidade do tratamento preliminar é a proteção dos equipamentos instalados nas unidades seguintes a fim de não prejudicar seu funcionamento pela presença dos materiais citados. O tratamento preliminar é realizado em um sistema de gradeamento, que é composto por uma grade mecanizada e duas grades de limpeza manual em paralelo, como reserva. Também apresenta duas unidades de desarenação, com remoção de areia de forma mecanizada, e três módulos de caixa de gordura com aeração. Na unidade do pré-tratamento há uma calha *Parshall* com medidor de vazão do tipo ultrassônico. Os resíduos retirados no tratamento preliminar são encaminhados para contentores do tipo caixa “*brooks*”, para posterior encaminhamento a aterro sanitário.

Após a etapa do tratamento preliminar, se inicia o tratamento biológico nos dois reatores anaeróbios UASB, por processo de biodigestão anaeróbica. A entrada do esgoto pré-tratado nos reatores UASB ocorre por meio de caixas de distribuição, que conduzem os tubos até o fundo do reator de forma a tornar o fluxo vertical e ascendente. O biogás gerado na biodigestão é canalizado e queimado no queimador *flare*.

No processo de biodigestão anaeróbica nos reatores UASB, além do biogás, há a formação de efluente de baixa e alta densidade (lodo). O efluente de baixa densidade é direcionado, por gravidade, para os aeradores e decantadores a fim de serem submetidos ao processo de tratamento aeróbico de forma a melhorar a eficiência do tratamento. O

tratamento aeróbico é um processo em que uma massa biológica cresce e floclula, sendo continuamente circulada e posta em contato com a matéria orgânica do líquido, em presença de oxigênio. O oxigênio é proveniente de ar injetado através de aeradores/sopradores com seus difusores dentro da mistura lodo líquido sob condições de turbulência. O efluente decantado nos decantadores é bombeado em forma de recirculação e submetido, novamente, ao pré tratamento (gradeamento). Por sua vez, o efluente sobrenadante (tratado), uma vez apresentando os parâmetros de lançamento previstos na legislação pertinente, é lançado no Rio Sangão, localizado a, aproximadamente, 500 m dos decantadores (NUVOLARI, 2011).

O efluente de alta densidade dos reatores UASB é conduzido por gravidade ao adensador, bombeado até a centrífuga e misturado com aglutinantes, desidratado e, ao final, é destinado a aterro sanitário. A água oriunda da desidratação é bombeada ao pré-tratamento.

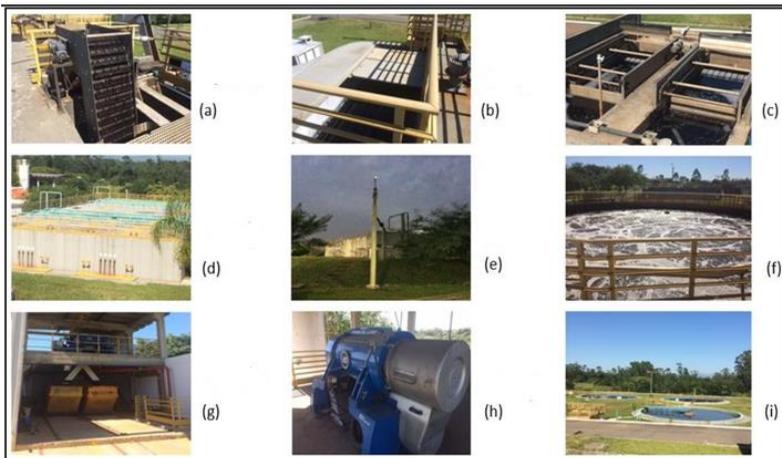


Figura 12 – Fluxograma do tratamento de esgoto na ETE Santa Luzia. (a) gradeamento; (b) caixa de areia; (c) caixa de gordura; (d) reatores UASB; (e) queimador *flare*; (f) tanque aerador; (g) lodo desidratado; (h) centrífuga; (i) decantadores. Fonte: Autor

No laboratório da ETE Santa Luzia são realizadas análises físico-químicas e biológicas do processo de tratamento. No esgoto não tratado são avaliados os seguintes parâmetros: Temperatura da amostra em °C; pH; Alcalinidade Total (mg/L); Oxigênio Dissolvido (mg/L); Óleos e Graxas (mg/L); Cor Verdadeira (uH); Turbidez (NTU); Detergentes (mg/L); Demanda Biológica de Oxigênio DBO (mg/L); Demanda

Química de Oxigênio DQO (mg/L); Nitrogênio Amoniacal (mg/L de N); Nitrogênio Nitrito (mg/L de N); Nitrogênio Nitrato (mg/L de N); Nitrogênio Total (mg/L de N); Fósforo Total (mg/L de P); Sulfeto (mg/L de S); Sulfato Total (mg/L de S); Sólidos Totais (mg/L); Sólidos Suspensos Totais (mg/L); Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L); Sólidos Sedimentáveis (mg/L); Coliforme Total (NMP/100ml) e *Escherichia coli* (NMP/100ml). Nos reatores UASB são monitorados os valores de temperatura da amostra em °C, Sólidos Totais (mg/L) e Sólidos Voláteis Totais (mg/L). Na saída dos reatores UASB são analisados nas amostras do efluente os seguintes parâmetros: Temperatura em °C; pH; Alcalinidade Total (mg/L); Demanda Bioquímica de Oxigênio DBO (mg/L); Demanda Química de Oxigênio DQO (mg/L); Sulfeto (mg/L de S); Sulfato Total (mg/L de S); Sólidos Totais (mg/L); Sólidos Suspensos Totais (mg/L); Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L); Sólidos Sedimentáveis (mg/L). Além dos parâmetros avaliados nas amostras, também são monitorados a temperatura do ar em °C e condição climática (sol/chuva) (CASAN, 2016a; CASAN, 2017a).

Na oficina da ETE Santa Luzia são realizadas as manutenções preventivas e corretivas dos equipamentos que são usados no sistema de tratamento de esgoto, como motores elétricos, motobombas, motoredutores, válvulas, registros, etc.

De acordo com dados fornecidos pela CASAN, o gasto mensal de energia elétrica na ETE Santa Luzia no período considerado nesta pesquisa correspondeu a uma média de, aproximadamente, R\$30.000,00. Conforme a Resolução Homologatória N° 2.286 de 15 de agosto de 2017, as Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) praticam na CASAN a Tarifa Convencional (Grupo B, subgrupo B3) para cobrança de energia elétrica, sendo em 2016 o valor de R\$ 0,3538/kWh e em 2017 o valor de R\$ 0,3818/kWh, não considerando os tributos e outros encargos (CASAN, 2016b; CASAN, 2017b).

4.2 PARÂMETROS LABORATORIAIS E DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA ETE

Para se estimar o potencial de geração de biogás e de energia elétrica utilizando modelos matemáticos é necessária a aquisição de parâmetros laboratoriais das amostras e de operação do reator UASB. Para tanto, nesta etapa foram coletados os dados referentes à vazão do esgoto afluente, temperatura de operação nos reatores UASB e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto afluente e efluente.

A estimativa da produção de biogás foi calculada a partir da vazão do esgoto afluente e dos valores da DQO do afluente e do efluente. A temperatura de operação nos reatores UASB foi utilizada nos cálculos da produção volumétrica de metano e, juntamente com o pH, para uma avaliação preliminar das condições de tratamento primário do esgoto na ETE e sua possível influência na produção de biogás.

Todos os dados foram coletados junto aos laudos laboratoriais emitidos pela ETE Santa Luzia e nos Boletins Diários de Operação (BDO's) da ETE e corresponderam ao período de janeiro de 2016 a dezembro de 2017. Além destes parâmetros, foram coletados os dados referentes ao consumo de energia elétrica da ETE no referido período fornecidos pela CASAN, para fins comparativos entre demanda e a produção de energia elétrica pelo uso do biogás, bem como para os cálculos de estimativa do capital a ser investido e do Tempo de Retorno do Capital (*Payback*) decorrente do aproveitamento energético do biogás na ETE.

4.3 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás na ETE foi estimada a partir da carga de DQO afluente ao reator que é convertida em gás metano (DQO_{CH4}), conforme Equação 1, descrita por Chernicharo (2016), onde:

$$DQO_{CH4} = Q * (S_0 - S) - Y_{abs} * Q * S_0 \quad (1)$$

DQO_{CH4} = carga de DQO convertido em metano (kgDQO_{CH4}/dia)

Q = Vazão de esgoto afluente (m³/dia)

S₀ = Concentração de DQO afluente (kgDQO/m³)

S = Concentração de DQO efluente (kgDQO/m³)

Y_{abs} = Coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 (kgDQO_{lodo}/KgDQO_{aplicado}))

Para a incógnita Y_{abs}, adotou-se o valor de 0,15 que é um valor médio obtido a partir da literatura da literatura (CHERNICHARO, 2016).

A partir dos cálculos da estimativa da carga de DQO afluente ao reator que é convertida em metano, se pode calcular a produção volumétrica de metano (m³CH₄/dia), utilizando-se as Equações 2 e 3 descrita por Chernicharo (2016), onde:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (2)$$

$$f(T) = \frac{P * K_{DQO}}{R * (273 + T)} \quad (3)$$

Q_{CH_4} = Produção volumétrica de metano (m^3CH_4 /dia)

$f(T)$ = Fator de correção para a temperatura operacional do reator ($kgDQO/m^3$)

P = Pressão atmosférica (atm)

K_{DQO} = DQO correspondente a um mol de CH_4 (64 g DQO/mol)

R = Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K)

T = Temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$)

Entretanto, existe uma parcela de perda de metano dissolvida no efluente, perda no gás residual, vazamento e purgas de condensado, as quais podem variar de 20% a 50% do volume total, sendo, portanto, importante considerá-las para se obter valores mais realísticos. Nessa pesquisa, adotou-se o quantitativo de perdas em 35%, conforme proposto por Lobatto (2011).

Uma vez obtida a produção volumétrica teórica de metano (Q_{CH_4}), pode-se estimar a produção total de biogás ($Q_{biogás}$) pela Equação 4 proposta por Chernicharo (2016), tendo como base a concentração de metano em sua composição, cujo valor adotado no presente trabalho foi de 60%, representando um valor intermediário do intervalo descrito na Tabela 2, onde:

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (4)$$

$Q_{biogás}$ = Produção volumétrica de biogás (m^3 /dia)

Q_{CH_4} = Produção volumétrica de metano (m^3 /dia)

C_{CH_4} = Concentração de metano no biogás (%)

Portanto, a partir dos dados obtidos do processo de tratamento e da aplicação das equações aqui descritas, foi possível estimar a produção volumétrica diária de biogás em função da DQO afluente e efluente e,

assim, determinar o potencial de geração de energia elétrica na ETE, conforme está descrito na Seção subsequente.

4.4 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para se estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás na ETE foi levado em consideração o valor do Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás, o qual depende da percentagem de CH₄ e CO₂ na sua composição, conforme apresentado na Tabela 3. Na presente pesquisa, assumiu-se uma concentração de 60% de CH₄ e 40% de CO₂ no biogás, cujo valor de PCI correspondente é de 4.229,98 kcal/kg.

Tabela 3 - Variação do Poder Calorífico Inferior em relação à composição do biogás.

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm³)	PCI (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Avellar (2001) *apud* Iannicelli (2008).

Para a determinação do Poder Calorífico Inferior em kWh/m³, utilizou-se a Equação 5, a qual determina o quantitativo em energia por metro cúbico de biogás, conforme Costa (2006), onde:

$$PCI_d = PE * PCI * K \quad (5)$$

PCI_d = Poder Calorífico Inferior disponível (kWh/Nm³)

PE = Peso Específico (kg/Nm³)

PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)

K = 4,19 kWh/3600 (Constante de conversão entre kcal-kJoules-kwh)

Em sistemas para conversão do biogás em energia elétrica, se deve levar em consideração o valor de eficiência global na conversão das máquinas térmicas, com grupos geradores que utilizam motores ciclo Otto, sendo que nesta pesquisa foi assumido o valor de 25%. Então, pela Equação 6, se pode estimar a potência elétrica final a ser disponibilizada, conforme descrita por Souza e colaboradores (2004), onde:

$$P = PTB * PCI_d * 0,25 \quad (6)$$

P = Potência elétrica disponibilizada (kW)

PTB = Produção total de biogás (m³/h)

PCI_d = Potencial Calorífico Inferior disponível (kWh/m³)

A produção mensal de energia elétrica a partir do biogás pode ser calculada conforme Equação 7, descrita por Souza e colaboradores (2004), onde:

$$E = P * h * m \quad (7)$$

E = Energia elétrica total disponibilizada pelo biogás (kWh/mês)

h = 24 horas = 1 dia

m = 30,4167 dias do mês

Portanto, com base na estimativa de geração de energia elétrica e no consumo efetivo pela ETE Santa Luzia, é possível uma melhor avaliação da possibilidade de sistema de aproveitamento do biogás para fins energéticos na ETE.

4.5 ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CO₂

Nesta etapa foram estimadas as emissões mensais e anuais produzidas de CO₂ em decorrência do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) pela ETE Santa Luzia nos anos de 2016 e 2017 e a emissão evitada de CO₂ em função do uso da energia elétrica produzida no aproveitamento do biogás neste período. Para esses cálculos, foram utilizados os dados de consumo de energia elétrica da ETE fornecidos pela CASAN, bem como os resultados da estimativa de produção de energia elétrica, a partir do biogás. Também foram obtidos os valores do Fator Médio de Emissão (FEM) de CO₂, para

energia elétrica dos anos 2016 e 2017 junto ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2018), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de emissão de CO₂ para energia elétrica

Meses	Fator de Conversão (tCO₂/MWh)
Janeiro	0,0763
Fevereiro	0,06755
Março	0,0703
Abril	0,0786
Mai	0,0774
Junho	0,0718
Julho	0,0845
Agosto	0,1074
Setembro	0,10805
Outubro	0,11455
Novembro	0,10975
Dezembro	0,0803

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2018)

A Equação 8 apresenta o cálculo de emissões de CO₂ proposta pelo MCTIC (2018), onde:

$$\text{CO}_2 = \text{CPE} * \text{FEM} \quad (8)$$

CO₂ = Emissão de CO₂ (KgCO₂)

CPE = Consumo ou produção de energia elétrica (kWh)

4.6 ANÁLISE PRELIMINAR DE INVESTIMENTO

Para a análise preliminar da viabilidade econômica da implementação do sistema de aproveitamento do biogás para fins energéticos na ETE, inicialmente, foi definido o grupo gerador a ser empregado, levando-se em consideração o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás e o consumo de energia elétrica na ETE Santa Luzia.

Após a definição do grupo gerador, foi efetuada a estimativa do Valor Presente Líquido Tempo (VPL) e do Tempo de Retorno de Capital (*Payback*), considerando-se o valor total do capital a ser investido, o valor

correspondente à energia gerada por ano com o uso do biogás na ETE, a taxa de desconto ou atratividade, conforme indicadores financeiros nacionais, e o período correspondente à vida média útil do gerador. Os custos com operação e manutenção do sistema gerador não foram considerados nos cálculos de investimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na presente Seção estão descritos e discutidos os resultados referentes aos parâmetros laboratoriais analisados, às estimativas de produção de biogás e de geração de energia elétrica, bem como das emissões produzidas e evitadas de CO₂ e da análise de viabilidade econômica do uso do biogás para geração de eletricidade. A partir desses resultados e sua discussão, foi possível elencar as conclusões decorrentes e apontar alternativas para o aperfeiçoamento dos estudos propostos nesta pesquisa.

5.1 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

Para uma avaliação preliminar das condições operacionais de tratamento primário dos esgotos sanitários em ETE e sua possível influência na produção de biogás e, conseqüentemente, na geração de energia elétrica, podem ser empregados parâmetros físico-químicos, os quais incluem a temperatura e o pH de operação dos reatores, bem como o seu potencial de remoção da carga de DQO afluente.

A Tabela 5 apresenta as médias mensais de temperaturas de operação dos reatores UASB no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2017.

Tabela 5 - Médias mensais das temperaturas de operação dos reatores em 2016 e 2017

Meses	Temperatura Média (°C)
Janeiro	26,5
Fevereiro	27,3
Março	27,7
Abril	26,5
Maiο	23,0
Junho	21,8
Julho	21,4
Agosto	21,0
Setembro	22,5
Outubro	23,4
Novembro	24,0
Dezembro	26,1

Fonte: CASAN (2016a); CASAN (2017a)

Os dados permitem demonstrar que as temperaturas assumiram um valor médio anual de $24,2 \pm 2,4$ °C, cujo resultado está próximo ao obtidos por Bilotta (2016), Cabral (2016), Gallina (2013) e Santos (2009) com valores de 21,1 °C, 21,8 °C, 21 °C e 23,5 °C, respectivamente. A partir desses dados se pode sugerir que os reatores operam na faixa mesofílica de temperatura, a qual é considerada a mais adequada para o crescimento bacteriano associado à biodigestão anaeróbica, conforme proposto por Chernicharo (2016).

Em relação às médias mensais de pH das amostras do afluente e efluente nos reatores no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2017 (Tabela 6), os mesmos assumiram valores médios anuais de $6,68 \pm 0,26$ e de $7,05 \pm 0,11$, respectivamente. Esses valores estão próximos aos valores obtidos por Farias (2012), que encontrou pH =7,47 no afluente e pH=7,58 no efluente, e por Herlleyson e colaboradores (2016), com pH=6,85 e 7,39 no afluente e efluente, respectivamente.

Tabela 6 - Médias mensais de pH das amostras do afluente e do efluente dos reatores em 2016 e 2017.

Meses	pH afluente (média)	pH efluente (média)
Janeiro	6,15	6,77
Fevereiro	6,45	7,05
Março	6,75	7,06
Abril	6,65	7,05
Maiο	6,70	7,06
Junho	6,40	7,00
Julho	7,00	7,15
Agosto	6,95	7,19
Setembro	7,05	7,01
Outubro	6,60	6,94
Novembro	6,85	7,11
Dezembro	6,65	7,02

Fonte: CASAN (2016a); CASAN (2017a)

Com base nos dados obtidos, se pode demonstrar que os biorreatores estão operando em uma faixa de pH próximo da neutralidade, sugerindo que o sistema é capaz de evitar variações extremas de acidez ou alcalinidade, o que contribui para o equilíbrio das fases de acidogênese e metanogênese da digestão anaeróbica conforme Foresti e colaboradores (1999).

As médias mensais da DQO do afluente e do efluente dos reatores UASB estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Médias mensais da DQO do afluente e do efluente aos reatores em 2016 e 2017

Meses	DQO (mg/L) afluente	DQO (mg/L) efluente	Δ DQO ($S_0 - S$)
Janeiro	511	188	323
Fevereiro	381	165	216
Março	1443	633	810
Abril	519	229	290
Maiο	406	326	80
Junho	510	297	213
Julho	1431	720	711
Agosto	787	517	270
Setembro	885	359	526
Outubro	345	251	94
Novembro	697	248	449
Dezembro	557	227	330

Fonte: CASAN (2016a); CASAN (2017a)

No referido período, a DQO do afluente assumiu um valor médio anual de 706 ± 377 mg/L e do efluente foi de 347 ± 181 mg/L. Pode-se observar que a Δ DQO foi mais pronunciada nos meses de março, julho, setembro e novembro. Foi possível constatar uma eficiência média anual de remoção DQO pelos reatores de 49% no período de estudo. Entretanto, trabalhos da literatura apontam para intervalo maiores (65% a 73%) de remoção durante o processo de biodigestão anaeróbica em reatores UASB de ETEs (BILOTTA, 2016; FELCA et al., 2015; SILVA, 2015).

Dessa forma, uma vez que a DQO é um parâmetro relevante para o monitoramento do sistema tratamento e da qualidade do esgoto com implicações econômicas e ambientais, faz-se necessários estudos complementares para se obter um melhor diagnóstico da eficiência do tratamento primário da ETE. Para tanto, se pode propor a avaliação de outros parâmetros físico-químicos e biológicos (ex: turbidez, coloração, DBO, Oxigênio Dissolvido, óleo e graxas, série de sólidos, detergentes, Nitrogênio, Fosforo, Sulfatos, coliformes etc) que estão envolvidos no processo de biodigestão nos reatores da ETE em estudo e estudar mecanismos de melhoria da sua operação.

5.2 PRODUÇÃO ESTIMADA DE BIOGÁS

Para se estimar o potencial de produção de biogás nos reatores da ETE em estudo foi, inicialmente, calculada a carga de DQO afluente

ao reator convertida em metano ($\text{kgDQO}_{\text{CH}_4}/\text{dia}$) utilizando-se a Equação 1, tendo-se como base os dados das médias mensais da DQO do afluente e do efluente dos reatores (já apresentados na Tabela 7) e as médias mensais de vazão esgoto afluente dos reatores os quais estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Médias mensais de vazão de esgoto afluente aos reatores em 2016 e 2017.

Meses	Vazão do esgoto tratado (m³/mês)
Janeiro	161.298
Fevereiro	196.166
Março	204.240
Abril	215.482
Maio	229.110
Junho	225.764
Julho	207.274
Agosto	232.630
Setembro	223.152
Outubro	224.854
Novembro	198.547
Dezembro	222.896

Fonte: CASAN (2016a); CASAN (2017a)

Os resultados da estimativa da carga mensal média de DQO afluente ao reator convertida em metano estão apresentados na Figura 13.

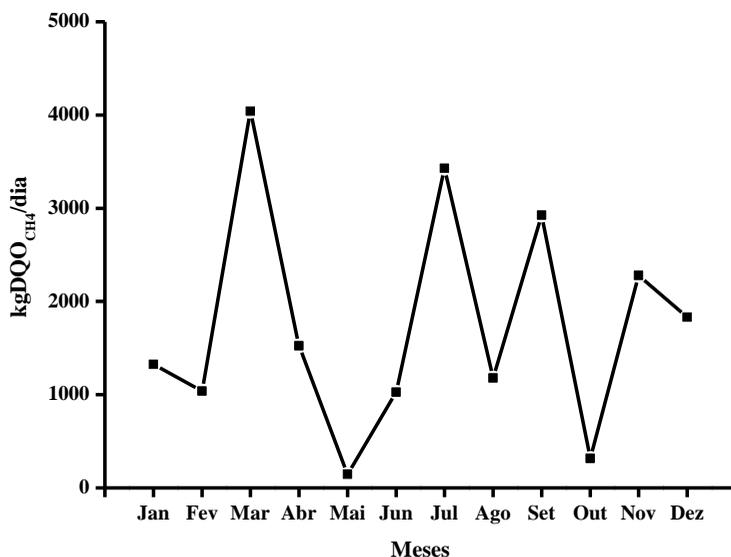


Figura 13 – Estimativa da carga mensal média de DQO afluente ao reator convertida em metano em 2016 e 2017. Fonte: Autor

Após calcular a carga de DQO_{CH_4} , foram efetuados os cálculos da estimativa de produção volumétrica de metano (Q_{CH_4}) usando-se a Equação 2. Para tanto, inicialmente, calculou-se o fator de correção para a temperatura operacional do reator $f(T)$, pela Equação 3, cujo resultado obtido foi 2,622.

Os resultados obtidos da estimativa de produção volumétrica mensal média de metano estão descritos na Figura 14.

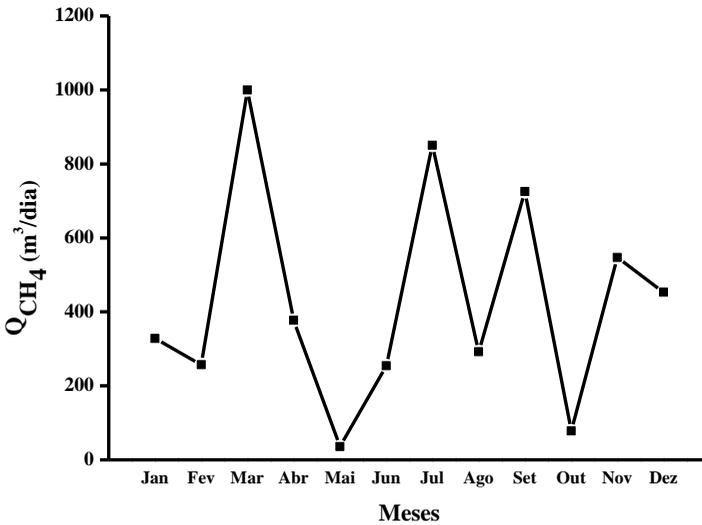


Figura 14 – Estimativa de produção volumétrica mensal média de metano em 2016 e 2017. Fonte: Autor

Uma vez calculada a produção volumétrica de metano (Q_{CH_4}), obtém-se a produção estimada mensal média de biogás ($Q_{biogás}$) calculada da pela Equação 4, cujos resultados foram apresentados na Figura 15.

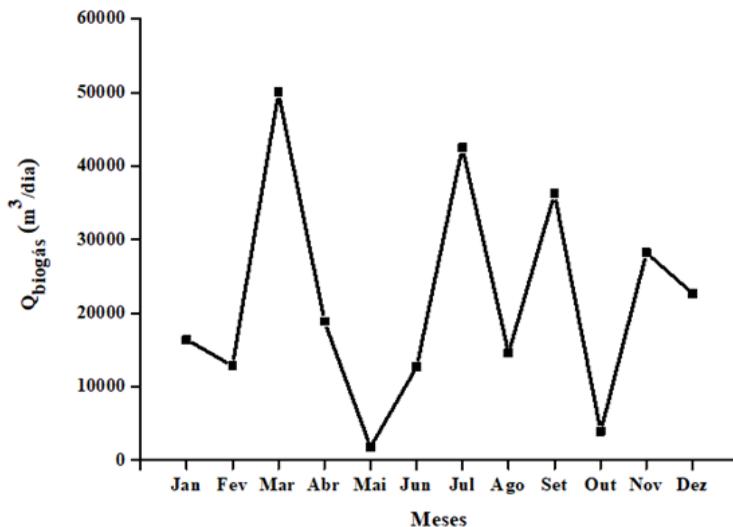


Figura 15 - Estimativa de produção volumétrica mensal média de biogás em 2016 e 2017. Fonte: Autor

Os resultados obtidos permitem demonstrar que a produção de metano e de biogás nos anos de 2016 e 2017 foi mais pronunciada nos meses março (19%), julho (16%) e setembro (14%). Esse perfil pode estar associado aos maiores valores da Δ DQO afluente/efluente (Tabela 7) e de conversão de DQO afluente ao reator em metano (Figura 13) observado nos meses de março, julho e setembro, uma vez que existe uma correlação direta entre esses parâmetros e a produção de metano e biogás.

Embora a temperatura e o pH de operação dos reatores, bem como a vazão do esgoto afluente sejam variáveis que influenciam na estimativa de produção de metano e de biogás, os seus valores se mostraram muito próximos entre os meses do período avaliado (Tabelas 5, 6 e 8), sugerindo que não seriam determinantes nos resultados da avaliação da produção de biogás da ETE em estudo.

Ao se avaliar o volume necessário de esgoto a ser tratado para produzir 1m^3 de biogás no período em estudo, os resultados apontam para uma estimativa de $23,9\text{m}^3$, cujo valor se encontra dentro de intervalos descritos na literatura (15m^3 a 32m^3), sugerindo que os resultados obtidos são satisfatórios para o parâmetro avaliado (BILLOTA, 2016; CABRAL, 2016; GALLINA, 2013; GOMES, 2017)

5.3 GERAÇÃO ESTIMADA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os resultados da geração mensal de energia elétrica estimada a partir do uso do biogás calculados pelas Equações 5, 6 e 7, bem como do consumo efetivo mensal pela ETE no período em estudo estão apresentados na Figura 16.

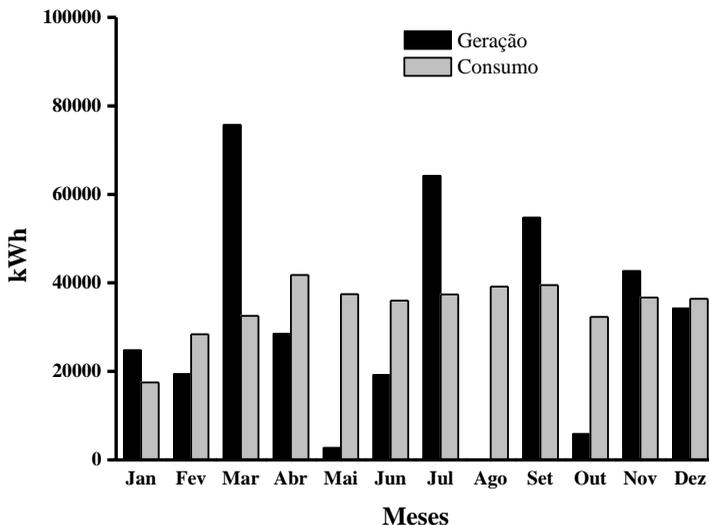


Figura 16- Estimativa de geração e consumo mensal médio de energia elétrica em 2016 e 2017. Fonte: Autor

Os resultados obtidos permitiram demonstrar que a geração total de energia elétrica estimada pelo aproveitamento do biogás nos anos de 2016 e 2017 foi de 788.975 kWh, sendo que o consumo da ETE Santa Luzia foi de 830.122 kWh. Com base nesses resultados, tem-se uma geração potencial capaz de suprir em 95% o consumo de energia elétrica da ETE no período em estudo.

Cabe destacar que nos meses de janeiro, março, julho, setembro e novembro a geração de energia elétrica média foi 42%, 133%, 72%, 39% e 16 % maior, respectivamente, do que o consumo nos referidos meses.

Ao se considerar os valores das tarifas de energia elétrica praticadas pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) na ETE

nos anos de 2016 e 2017, foi possível estimar uma economia anual de R\$ 145.960,44 em decorrência da geração de energia elétrica a partir do biogás.

Trabalhos da literatura também descrevem valores relacionados à geração, consumo e economia de energia elétrica em ETE pelo aproveitamento de biogás. Dentre os mesmos, pode-se citar o de Gallina (2013), o qual constatou uma geração de energia elétrica de 24.480 kWh/mês a partir do uso do biogás, um consumo de 73.375 kWh/mês pela ETE e uma economia mensal de R\$7.322,49 decorrentes da geração de energia. Billota (2016) descreve uma capacidade de geração de 65.280,3 kWh/mês, um consumo de 110.405kWh/mês e uma redução 59% de gastos de energia elétrica pelo aproveitamento do biogás produzidos em ETE.

Portanto, as estimativas de produção de energia elétrica observados nesta pesquisa são de grande relevância, uma vez que pode contribuir para a redução dos custos operacionais da ETE Santa Luzia e o capital economizado pode ser investido na elaboração de projetos técnicos de geração de energia elétrica a partir do biogás. Entretanto, estudos complementares de caracterização do biogás gerado se faz necessário, a fim de se avaliar a necessidade seu prévio tratamento.

5.4 EMISSÕES ESTIMADAS DE CO₂

A Figura 17 apresenta os resultados das estimativas de emissões de CO₂ em decorrência do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) pela ETE Santa Luzia nos anos de 2016 e 2017, bem como da emissão evitada em função do uso da energia elétrica produzida no aproveitamento do biogás considerando o mesmo período. Para estes cálculos, foram utilizados os dados de consumo de energia elétrica da ETE fornecidos pela CASAN, bem como os resultados obtidos de produção estimada de energia elétrica dada pela Equação 7 e os valores do Fator Médio de Emissão de CO₂ para energia elétrica do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (Tabela 4).

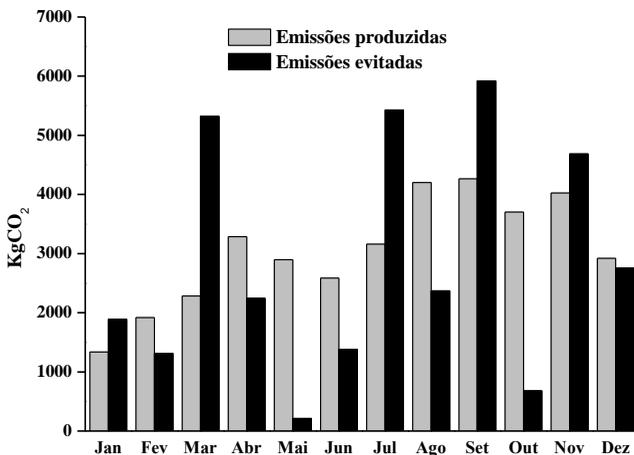


Figura 17- Estimativa de emissões médias mensais produzidas e evitadas de CO₂ em 2016 e 2017. Fonte: Autor

Os resultados apontam que as emissões totais de CO₂ correspondentes ao consumo de energia elétrica do SIN pela ETE no período em estudo foi de 73.173 kgCO₂. A partir dos resultados de produção estimada total de energia elétrica, foi possível calcular a emissão evitada de CO₂ pelo aproveitamento do biogás, cujo resultado no período foi de 68.404 kgCO₂. Esses resultados permitem estimar que o aproveitamento do biogás pode reduzir em 93,5 % as emissões totais de CO₂ no período avaliado.

É importante destacar que nos meses de março, julho, setembro e novembro obteve-se uma redução de 133%, 72%, 39% e 16% de emissão de CO₂, respectivamente, em comparação com as emissões produzidas nos referidos meses, o que também está relacionado a uma maior produção de biogás e eletricidade neste período do ano, conforme estimados nessa pesquisa.

Silva (2015) também avaliou a redução de emissões CO₂ em ETE pelo aproveitamento do biogás para geração de energia no período de outubro de 2011 a setembro de 2012, cujo resultado obtido foi de 106.071 kg de CO₂ evitados.

Os resultados obtidos de emissão de CO₂ no presente estudo se mostram relevantes, uma vez que o aproveitamento dos esgotos sanitários

para fins energéticos é capaz de reduzir os seus impactos negativos ao meio ambiente, vindo ao encontro dos compromissos assumidos pelo Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, na qual busca-se a estabilização das concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera e o uso de formas renováveis de energia e de tecnologias de sequestro de dióxido de carbono.

5.5 ANÁLISE PRELIMINAR DE INVESTIMENTO

Conforme já mencionado, na análise preliminar da viabilidade econômica de aproveitamento do biogás para fins energéticos, inicialmente, é necessário ser definido o grupo gerador a ser empregado, levando-se em consideração o potencial de geração de energia elétrica na ETE.

Os resultados obtidos indicaram que a potência elétrica na pelo uso do biogás na ETE foi estimada em 45,1 kW, correspondente à média no período de 2016 e 2017. Tendo como base este valor, foi sugerido a escolha de um Grupo Gerador de Energia à Biogás Ciclo Otto, Potência de Regime Contínuo de 44,8kW, com uma vida útil média 13 anos, cuja tecnologia está disponível no mercado.

Após a definição do grupo gerador, foram estimados os investimentos necessários para a aquisição e instalação do mesmo, cujos valores estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9- Investimentos relativos ao grupo gerador de energia elétrica

Especificações	Valores de Custo (R\$)
Grupo Gerador à Biogás	123.000,00
Obras Civis	11.730,00
Instalação Elétrica	2.639,25
Sistema de Proteção Térmica do Escapamento	5.278,50
Tubulações	5.278,50
Entrega do Grupo Gerador (Frete)	2.639,25
Margem de Incerteza (20 %)*	30.113,10
BDI-Benefícios e Despesas Indiretas (20%)**	36.135,72
Valor total do capital investido	216.814,32

*Margem de incerteza a fim de corrigir eventuais distorções nos valores orçados.

**Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) para provisão de outros custos indiretos não relacionados na planilha orçamentária.

Para as estimativas do Valor Presente Líquido (VPL) e do Tempo de Retorno de Capital (*Payback*) e foi levado em consideração o valor correspondente à energia gerada por ano com o uso do biogás na ETE, cujo resultado obtido foi de R\$ 145.960,44. A taxa de desconto ou atratividade foi assumida de 12% ao ano, conforme indicadores financeiros nacionais e a quantidade de anos considerado foi de 13 anos, o qual corresponde à vida média útil do gerador.

Na Tabela 10 está descrito os resultados dos cálculos de fluxo de caixa, fluxo descontado e saldo decorrente para fins da estimativa do Valor Presente Líquido, cujo valor foi de R\$720.769,63. O valor positivo do VPL indica que o investimento é economicamente viável, uma vez que o retorno financeiro advindo da energia gerada na ETE suplanta o valor alcançado com a aplicação da taxa de atratividade sobre o capital investido no período de 13 anos.

Tabela 10- Cálculos de fluxo de caixa, fluxo descontado e saldo decorrente

Ano	Fluxo de caixa (R\$)	Fluxo descontado (R\$)	Saldo (R\$)
0	- 216.814,32	- 216.814,32	-216.814,32
1	145.960,44	130.321,82	- 86.492,50
2	145.960,44	116.358,77	29.866,27
3	145.960,44	103.891,76	133.758,03
4	145.960,44	92.760,50	226.518,53
5	145.960,44	82.821,87	309.340,40
6	145.960,44	73.948,10	383.288,50
7	145.960,44	66.025,09	449.313,59
8	145.960,44	58.950,97	508.264,57
9	145.960,44	52.634,80	560.899,36
10	145.960,44	46.995,36	607.894,72
11	145.960,44	41.960,14	649.854,86
12	145.960,44	37.464,41	687.319,27
13	145.960,44	33.450,37	720.769,63

Os resultados também permitem estimar um Tempo de Retorno de Capital (*Payback*) de 1,7 anos (21 meses), cujo prazo pode ser considerado relativamente curto, o que torna o investimento significativamente atrativo.

Portanto, os estudos prévios de viabilidade econômica permitem sugerir que o aproveitamento do biogás na ETE é promissor e pode reduzir os gastos de operação da estação e permitir investimentos na sua infraestrutura, com conseqüente melhoria na prestação de seus serviços junto à comunidade. Entretanto, estudos complementares necessitam ser efetuados, utilizando outras ferramentas de avaliação de investimento para que se obtenha resultados mais consistentes, de forma a conferir maior segurança na tomada de decisões relativas ao uso do biogás na ETE.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A partir da execução da presente pesquisa, se pode concluir que:

. A busca por fontes alternativas, limpas e renováveis de energia é uma importante demanda na atualidade;

. Os esgotos sanitários constituem biomassa residual que, potencialmente, podem ser empregados na produção de biocombustível e bioenergia, com destaque para o biogás e sua conversão em energia elétrica em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE):

. A análise de parâmetros físico-químicos é importante para se avaliar as condições operacionais de tratamento primário dos esgotos sanitários em ETE, bem como para os cálculos de estimativa de produção de biogás, geração de eletricidade e emissões de CO₂;

. Na ETE Santa Luzia, o processo de biodigestão anaeróbica nos reatores UASB se desenvolvem em pH próximo da neutralidade e em temperatura mesofílica, cujas condições são adequadas para o sistema de tratamento primário;

. A eficiência de remoção de DQO dos reatores UASB da ETE Santa Luzia foi inferior em comparação com outros trabalhos da literatura, o que aponta para a necessidade de um melhor diagnóstico, monitoramento e otimização do processo de biodigestão anaeróbica;

. A estimativa da produção de biogás e da geração de eletricidade foi mais evidenciada nos meses de março, julho, setembro e novembro, o que pode ser decorrente dos maiores valores da Δ DQO afluente/efluente e de conversão de DQO afluente ao reator em metano observados nestes meses durante o período avaliado;

. A geração potencial total de eletricidade a partir do biogás é capaz de suprir em grande parte a demanda da ETE Santa Luzia no período em estudo, o que indica um potencial de redução dos custos operacionais da ETE;

. Os estudos preliminares da estimativa do capital total a ser investido, do Valor Presente Líquido e do Tempo de Retorno de Capital apontam para

a viabilidade econômica do aproveitamento do biogás para fins energéticos na ETE;

. A utilização da energia elétrica gerada a partir do biogás gerado na ETE em estudo pode contribuir para a redução das emissões de CO₂ e, assim, amenizar os impactos ambientais relacionados;

. Os estudos e os resultados obtidos nesta pesquisa podem servir de subsídios para futuros projetos de aproveitamento do biogás gerado em ETEs para fins energéticos;

Para se ter um maior aprofundamento dos estudos voltados ao aproveitamento energético de resíduos gerados na ETE Santa Luzia, algumas perspectivas podem ser apontadas, as quais incluem:

. Avaliação de outros parâmetros físico-químicos e biológicos monitorados na ETE, de forma a se ter uma melhor avaliação da eficiência do seu processo de tratamento primário e da influência desses parâmetros na produção de biogás;

. Caracterização do biogás produzido a fim de avaliar sua composição e a necessidade de tratamento conforme requisitos de aplicação do sistema de conversão proposto;

. Realização de estudos complementares de viabilidade técnica e econômica relacionados à elaboração, implantação e monitoramento de sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE e do aproveitamento da eletricidade excedente no sistema de geração distribuída;

. Avaliação da estimativa de geração e aproveitamento da energia térmica a partir do biogás e do biodigestato;

. Estudo da performance ambiental em diferentes cenários de gerenciamento dos resíduos gerados na ETE por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, A.; BATTINI, F.; GIUNTOLI, J.; TABAGLIO, V.; PADELLA, M.; BAXTER, D.; MARELLI, L.; AMADUCCI, A. Environmentally Sustainable Biogas: The Key Role of Manure Co-Digestion with Energy Crops. **Energies**, v. 8, p.5234-5265; 2015.doi:10.3390/en8065234. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/8/6/5234/htm>>. Acesso em: 2 nov. 2018.
- ALVES, I. R.F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5078>. Acesso em: 25 abr. 2018
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Atlas Esgotos: Depoluição de Bacias Hidrográficas. 2009.** Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>. Acesso em: 23 maio de 2019.
- ANGELIDAKI, I.; LAURA, T.; PANAGIOTIS, T.; GANG, L.; STEFANO, C.; HENRIK, W.; PANAGIOTIS, G. K. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives Irimi. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2. p. 452-466. 2018. Disponível em: <[http://orbit.dtu.dk/en/publications/biogas-upgrading-and-utilization-current-status-and-perspectives\(d0d84e46-0766-40e9-bffb-bf6f3b3f631b\)/export.html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/biogas-upgrading-and-utilization-current-status-and-perspectives(d0d84e46-0766-40e9-bffb-bf6f3b3f631b)/export.html)>. Acesso em: 2 nov. 2018.
- ARSLAN, C.; SATTAR, A.; CHANGYING, J.; NASIR, A.; ALI MARI, I.; ZIA BAKHT, M. Impact of pH management interval on biohydrogen production from organic fraction of municipal solid wastes by mesophilic thermophilic anaerobic codigestion. **BioMed Research International**, v. 2015, p. 1-9; 2015. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/590753/citations/>>. Acesso em: 15 out. 2018.
- AVELLAR, L. H. N.; COELHO, S. T.; ALVES, J. W. Geração de Eletricidade com Biogás de Esgoto: Uma Realidade. **Biociência & Desenvolvimento**, Ano V, n. 29, p. 120-122, nov/dez. 2002.

BARREIRA, P. **Biodigestores**: Energia, fertilidade e saneamento para zona rural. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011. 106 p.

BARRETO, V. V.; ALMEIDA, A. S. C. A.; BELCHIOR, C. R. P. Análise de desempenho e de emissões em um motor de combustão interna alimentado com biogás. **Acta Mechanica et Mobilitatem**. v.2, n.5., p. 39-44, 2017.

BERNS, B. A.; SCHNICKE, H.P.; BOMBONATTI, P. **Anteprojeto de uma usina de pesquisa e capacitação em biogás/Probiogás**. organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)”, Brasília-DF: Ministério das Cidades. 160p., 2015.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Princípios de finanças corporativas**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BILOTTA, P.; ROSS, B.Z.L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. Artigo Técnico, **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.21, n.2, p. 275-282, abr/jun 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/esa/v21n2/1809-4457-esa-S1413_41522016141477.pdf . Acesso em: 17 ago. 2018.

BOWEN, E.J.; DOLFING, J.; DAVENPORT, R.J.; READ, F.L.; CURTIS, T.P. Low-temperature limitation of bioreactor sludge in anaerobic treatment of domestic waste- water. **Water Sci Technol**, v.69, n.5, p 1004-1013, Mar,2014. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/69/5/1004/18306/Lowtemperature-limitation-of-bioreactor-sludge-in> . Acesso em: 13 ago. 2018.

BRASIL. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: MCTI, 2016.

BRASIL. Lei n. 12.187 de 29 de dezembro de 2009. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, DF, 29 dez. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 02 maio 2016.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos.** Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Brasília: SNS/MDR, 2019.

CABRAL, C.B. G. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário.** Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, - Universidade Federal de Santa Catarina- Florianópolis, 2016.

CARVALHO, S. L. D.; CÉSAR, G. N.; SANTOS, B. S. Uso de Biodigestores para Fins Energéticos em Propriedades Rurais. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v.85, n1, p. 1–11, 2016. Disponível em : <https://semanaacademica.org.br/artigo/uso-de-biodigestores-para-fins-energeticos-em-propriedades-rurais>. Acesso em: 11 jun. 2018.

CASAN. Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Manual de Operação do Sistema de Esgotamento Sanitário de Criciúma.** Santa Catarina: CASAN, 2012.

CASAN. Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Plano de Monitoramento de Estação de Tratamento de Esgoto.** Santa Catarina: CASAN, 2016a.

CASAN. Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Plano de Monitoramento de Estação de Tratamento de Esgoto.** Santa Catarina: CASAN, 2017a.

CASAN. Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Sistema Cice: Comissão Interna de Conservação de Energia.** Santa Catarina: CASAN, 2016b.

CASAN. Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Sistema Cice: Comissão Interna de Conservação de Energia.** Santa Catarina. CASAN, 2017b.

CASTANHO, D. S.; ARRUDA, H. J. Biodigestores. In: SEMANA DE TECNOLOGIA EM ALIMENTOS, 06., 2008, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: UTFPR, 2008. Disponível em:

<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/18064>. Acesso em: 05 jun. 2017.

CAVINATTO, V. M. **Saneamento básico**: fonte de saúde e bem-estar. São Paulo: Ed. Moderna, 2012.

CELESC. Centrais Elétricas de Santa Catarina. **Evolução do Efeito Médio Tarifário para o Consumidor**. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/1140-tarifa>. Acesso em: 27/02/2019.

CENTRAL. Banco Central do Brasil. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>, Acesso em: 10 abr. 2019.

CHERNICHARO, C. A. L **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Ampl. e atual. Belo Horizonte - Minas Gerais: Editora UFMG, 2016.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de Energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA (CBE), 11., 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. p. 547-562, 2006.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. 732 p.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia), PIPGE/Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/Dissertacao_David.pdf . Acesso em: 14 jan. 2018.

DIRECTIVA. **Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009**. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:32009L0028>. Acesso em 19 abril 2019.

DIVYA, D.; GOPINATH, L.R.; CHRISTY, P.M. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.42, p. 690–699. Fev. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008806>. Acesso em: 14 jan 2019.

EKAMA G.A.; WENTZEL M.C.; **Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design, Organic material removal.** IWA Publishing, London, UK. 2008.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2018:** Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. EPE, 2018.

FARIA, R.A.P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto, estudo de caso.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Cascavel, Paraná, 2012. Disponível em: http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Rui_A_P_Faria.pdf. Acesso em: 11 jul 2018.

FELCA, A.T.A.; GLÓRIA, F. R.; BARROS, R. M.; ALVES, A. P. **Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto.** In: XII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, Maio de 2015 – Poços de Caldas. Minas Gerais. **Anais [...]**. p. 1-7. 2015.

FILHO, N. C.; KOPITTKE, B. H. **Análise de investimentos:** matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial, 11.ª ed. São Paulo: Atlas. 411p., 2010.

FONSECA, F. S. T.; ARAÚJO, A. R. A.D.; HENDGES, T.L. Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso. **Agropecuária, Meio ambiente e Desenvolvimento Sustentável.** Porto Alegre, p. 1-19, jul, 2009. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 2009, [Porto Alegre, RG].

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. **Tratamento de esgotos sanitários por**

processo anaeróbio e disposição controlada no solo. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999.

FRANÇA JÚNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/nuplen/analise-do-aproveitamento-energetico-do-biogas-produzido-numa-estacao-de-tratamento-de-esgoto.pdf> . Acesso em: 23 set. 2018.

GADELHA, E. P. **Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.** Dissertação (Mestrado), Engenharia Civil e Ambiental – Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2005. Disponível em : <http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/05/Edmundo-Pacheco-Gadelha.pdf>. Acesso em: 25 dez. 2017.

GALLINA, T. F. **Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás das estações de tratamento de esgoto de Florianópolis** – Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 2013. Disponível em : <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/125069>. Acesso em: 28 ago. 2018.

GERBA, C. P; PEPPER, I.L. / **Wastewater Treatment and Biosolids Reuse. Environmental Microbiology.** Elsevier Inc.v.2, n.24, p. 503-530. 2009. Disponível em: https://ac.els-cdn.com/B9780123705198000249/3-s2.0-B9780123705198000249-main.pdf?_tid=a0cabed9-fe57-4ecc-afc5-619a47287a1a&acdnat=1552614901_480c5823d81113f14e5f46f46b36771a_. Acesso em: 11 dez. 2017.

GOMES, H. P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise econômica de projetos.** Rio de Janeiro: ABES, 2005.

GOMES, H. P. **Avaliação econômica: eficiência energética,** 1.a ed. João Pessoa: UFPB. 100p., 2014.

GOMES, G. V; SUDA, S. J; ROSA, A. P. ROSA; RODRIGUES, F. A. Estudo da produção de energia elétrica a partir de biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**. v. 3, n. 7, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/ojs/jcec/index.php/req2/article/view/281>. Acesso em: 7 ago. 2017.

GUNASEELAN, V.N. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. **Biomass Bioenergy**, v.13, p.83-114. 1997. Disponível em: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf> . Acesso em: 30 fev. 2018

HERLLEYSON, P. G. C.; SAMPAIO, M. B.; BEZERRA, E.L; MILHOME, M. A. L. Produção de metano a partir do tratamento de esgoto sanitário visando energia alternativa. **Ciência e Sustentabilidade**, v. 2, n. 1, p. 23-40, jan/jun 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufca.edu.br/ojs/index.php/cienciasustentabilidade/article/download/104/78> Acesso em: 20 jul. 2018.

IANNICELLI, A. L. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UNITAU, Taubaté/SP. 2008. Disponível em: http://www.bdttd.unitau.br/tedesimplificado/tde_arquivos/5/TDE-2012-10-09T160858Z-290/Publico/Andre%20Luiz%20Iannicelli.pdf . Acesso em: 22 set. 2018.

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**: 2008. Rio de Janeiro 2010. 218p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2019.

INOVAGRID. **Geração de energia com biogás**, 2017. Disponível em: www.inovagrid.com. Acesso em: 13 out. 2017.

IPCC 2006. **Waste**. In: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Disponível em : <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 11 out. 2018.

JAIN, S.; WOLF, I. T.; LEE, J.; TONG, Y. W. A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v.52, p.142-154, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.091. Disponível em: <http://eprints.covenantuniversity.edu.ng/10111/1/FULL%20THESIS%20LATEST.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2018.

JORGE, L. H. A.; OMENA, E. **Biodigestor. Dossiê Técnico**. SENAI/AM- Escola SENAI. Antônio Simões. Março, 2012.

KALLISTOVA, A.Y.; GOEL, G.; NOZHEVNIKOVA, A.N. Microbial diversity of methanogenic communities in the systems for anaerobic treatment of organic waste. **Microbiology** v.83, n.5, p.462–483. Set. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266144505_Microbial_diversity_of_methanogenic_communities_in_the_systems_for_anaerobic_treatment_of_organic_waste . Acesso em: 23 mar. 2018.

KESKIN, B.; BOZKURT, M.A.; AKDENIZ, H. 2010. The effects of sewage sludge and nitrogen fertilizer application on nutrient and (Bromus inermis Leyss). **Journal of Animal and Veterinary Advances**, v. 9, n.5, p.: 896-902. Mai. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/240828025_The_Effects_of_Sewage_Sludge_and_Nitrogen_Fertilizer_Application_on_Nutrient_and_Bromus_inermis_Leyss/download. Acesso em: 11 ago. 2018.

KHANAL, S.K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications**. Ames, Iowa, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

KWIETNIEWSKA, E.; TYS, J. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v.34, p.491–500 2014. Disponível em : <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032114002020?token=84383D4501A83BEF6B79307B1393F80D0EAC19975733A203A5E1C0728B92BA8A2BE9A85EB3FA4293FE76416FDEA505DD>. Acesso em: 29 ago. 2018.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; ZEEUW, W. D.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, p. 699–734, 1980.

LIMA, J. D. de ; SCHEITT, L. C.; BOSCHI, T. de F.; SILVA, N. J. da; MEIRA, A. A. de; DIAS, G. H. Propostas de ajuste no cálculo do payback de projetos de investimentos financiados. **Custos e @gronegocio online**, Recife, v. 9, n. 4, p. 162- 180, out./dez., 2013. Disponível em: <http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero4v9/calculo%20payback.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2019

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ENGD-8KYNF3>. Acesso em 27 jul. 2018.

LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. Vol. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 588 p.

MACHADO, L. L. N. **Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli512.pdf>. Acesso em: 22 set 2018.

MAO, C.; YONGZHONG, F.; XIAOJIAO, W.; GUANGXIN, R. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.45,n.c, p.540–555. 2015. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v45y2015icp540-555.html>. Acesso em: 23 abr. 2018.

MAPS, GOOGLE (Brasil). **ETE- Santa Luzia. Rodovia Antônio Just**. Imagem de Satélite, color. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-28.7110735,-49.4184416,397m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>. . Acesso em: 30 nov.2017.

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Clima, Fator Médio – Inventários Corporativos, 2018.** Disponível em:

https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html. Acesso em 17 dez. 2018.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse**, 5th Edition, McGraw-Hill, 2016.

MONTE, M. M. **Contributo para o Estudo da Valorização Energética de biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais.** 2010. Dissertação (mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010. Disponível em:

https://run.unl.pt/bitstream/10362/3941/1/Monte_2010.pdf. Acesso em: 11 dez 2017.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: viabilidade econômica.** 2015. Nota Técnica, Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente da USP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/mifoto.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2019.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: A alternativa energética.** São Paulo: Nobel, 1992. 93 p.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reuso Agrícola.** 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

OLIVER, A. P. M. **Manual de Treinamento em Biodigestão.** Instituto de Estudos Del Hambre. 2008. Disponível em: <http://docplayer.com.br/3948560-Manual-de-treinamento-em-biodigestao.html>. Acesso em: 02/11/2017.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/tese_vanessapecora.pdf. Acesso em: 26 ago. 2018.

PELLISSARI, A. S.; GONZALEZ, I. V. de F. P.; VANALLE, R. M. Competências gerenciais: um estudo em pequenas empresas de confecções. **Revista de Administração**, Porto Alegre, v. 17, n. 01, p. 149-180, jan./abr. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-23112011000100006&script=sci_abstract&tlng=pt Acesso em: 14 mai. 2019.

PILAVACHI, P.A. Mini and micro-gas turbines for combined heat and power. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, p. 2003-2014. Ago. 2002. Disponível em: https://www.bioturbine.org/Publications/PDF/microturbine%20market_2003_04_15-Pilavachi.pdf. Acesso em: 9 jan. 2018.

ROOPNARAIN, A.; ADELEKE, R. Current status, hurdles and future prospects of biogas digestion technology in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, n.c, p. 1162–1179, 2017. Disponível em : <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v67y2017icp1162-1179.html>. Acesso em: 17 abr. 2018

RUTZ, D. **Sustainable heat use of biogas plants**. A handbook, 2.a ed. Munich, Germany: WIP Renewable Energies, 2015.

RUIZ, R. L. **Microbiologia Zootécnica**. São Paulo: Roca, 1992. 314 p.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-Econômica e Ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da Vinhaça em tecnologias para geração de energia**. 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2007. Disponível em: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0032785.pdf>. Acesso em 23 out 2018.

SAMILAK, R.; BITTENCOURT, J., V., M.; PILATTI, L., A.; KOVALESKI, J., L. **Biodigestor Como Opção Para Tratamento de Resíduos Agroindustriais**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

SAMANEZ, C. P. **Engenharia econômica**, 1.a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 210p., 2009.

SANTOS, N. S. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de Madre de Deus.** 2009. Dissertação (Mestrado) -Mestrado Profissional Tecnologias Aplicáveis- Faculdade de Tecnologia e Ciências. Salvador, Bahia, 2009. Disponível em: <http://portal.ftc.br/bioenergia/dissertacoes/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Neila%20Santana.pdf> Acesso em: 25 jan 2018.

SASSE, L. **Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries.** India: Bremen Overseas Research and Development Association. Borda, 1998.

SILVA, C. E. Utilização do biodigestor: viabilidade técnica e econômica, AEQ- Instituto Aequitas Consultoria Agrotecnológica. In: X ENEL - ENCONTRO NORDESTINO DO SETOR DE LEITE E DERIVADOS. 2013, Imperatriz-Ma. **Anais[...]**. 2013.

SOUZA, S.N.M.; PEREIRA, W.C.; NOGUEIRA, C.E.E; PAVAN., A.A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta cientiarum: Technology.** Maringá, v. 26, n. 2, p.127-133, dez. 2004. Disponível em: <https://portal.ufsm.br/biblioteca/pesquisa/downloadArquivo.html;jsessio nid...4463>. Acesso em: 11 nov. 2018.

SURENDRA, K.C.; TAKARA, D.; HASHIMOTO, A.G.; KHANAL, S.K. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: opportunities and challenges. **Renewable Sustainable Energy Reviews.** v.31, p.846–859, 2014. Disponível em: <https://wenku.baidu.com/view/f7391db3f90f76c660371a29.html>. Acesso em: 06 fev. 2018.

TARRENTO, G. E.; MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: SIMPEP, 13. 2006. Bauru, SP, Brasil, **Anais[...]**, 2006.

TEODORITA, S.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KOTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas Handbook.** Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg. 125p., 2008.

TOLMASQUIM, M.T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** EPE: Rio de Janeiro, 2016.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- USEPA. **A brief characterization of reciprocating engines in combined heat and power applications.** Washington, D.C.: 2003.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos.** Campina Grande: Epgraf, 1994. 240p.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG,R.;BORGNAKKE,C. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 594 p.

VERSIANI, B. M. **Desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais tratando esgotos sanitários do campus da UFRJ.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp011810.pdf>. Acesso em 11 out 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG/DESA, 2005.

WEISE, A. D. **Engenharia econômica:** polígrafo, disciplina engenharia econômica. Santa Maria: Pós-graduação em Engenharia Produção, 2013.

ZHANG, C.; SU, H., BAEYENS, J.; TAN, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v.38, p.383-392, Out. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003633?via%3Dihub>. Acesso em: 16 dez. 2018.