



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

THIAGO PIRES

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Palhoça

2020

THIAGO PIRES

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade do
Sul de Santa Catarina como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Ambiental Sanitarista

Orientador: Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior

Palhoça
2020

THIAGO PIRES

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DO LODO DE ESGOTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Sul de Santa Catarina.

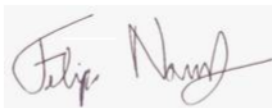
Palhoça, 15 de julho de 2020.



Professor e orientador Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Msc. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Profa. Silene Rebelo, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Felipe de Barros Nassif, Msc. Eng. Mec.
Nassif Renewable Energy

RESUMO

Considerando a problemática para a destinação do lodo de esgoto no país, busca-se alternativas para a sua disposição. A alternativa aqui apresentada se refere a recuperação energética a partir do lodo de esgoto proveniente de uma estação de tratamento teórica por lodo ativado baseado no atendimento a 285 mil pessoas em seu final de plano no município de Florianópolis, estação similar a atual ETE Insular. Foram avaliadas as alternativas de geração de biogás a partir da digestão anaeróbica do lodo excedente assim como a queima do lodo bruto e digerido em caldeira e avaliado seus potenciais assim como a redução de massa e volume a ser destinado ao fim dos processos. Dentre estes a queima do lodo bruto foi a que possuiu maior potencial, seguido pelo biogás. Quanto a redução do volume tanto a queima do lodo bruto quanto a o processo combinado de biogás e queima do lodo digerido apresentaram maior redução, enquanto apenas a digestão do lodo para geração do biogás apresentou menor resultado.

Palavras-chave: Geração de energia. Lodo de esgoto. Biogás.

ABSTRACT

Considering the problematic for the destination of the wastewater sludge in the country, it became necessary to find new alternatives to its disposition. The alternative presented here refers to the energy recovery from the wastewater sludge coming from a theoretical active sludge wastewater treatment plant capable of receiving effluent from 285 thousand people by its final plan in the Florianópolis County, a plant similar to the existing ETE Insular. The alternatives evaluated were the generation of biogas from the anaerobic digestion of the excess sludge as well as the burning of the raw and digested sludge in a boiler. It was evaluated its respective energy potential and mass reduction by the end of each respective process. Among the processes the burning of the raw sludge had the most energy potential, followed by the biogas. About the weight reduction both the raw sludge and the combined process of the biogas and the digested sludge presented the same and higher results followed by the sludge digestion which presented less reduction.

Keywords: Energy generation. Wastewater sludge. Biogas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVO GERAL	8
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2	REFERENCIAL	9
2.1	ÁGUAS RESIDUÁRIAS	9
2.2	TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS	9
2.2.1	Processos de tratamento	10
2.3	LODO DE ESGOTO	13
2.3.1	Adensamento	14
2.3.2	Estabilização	14
2.3.3	Desaguamento	21
2.3.4	Destinação do lodo	31
2.4	GERAÇÃO DE ENERGIA	33
2.4.1	Caldeira	33
2.4.2	Turbina a vapor	34
2.4.3	Motogerador	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	PARÂMETROS DE PROJETO	37
3.1.1	Vazão média	38
3.1.2	Cargas de SST e DBO	38
3.1.3	Produção de excesso de lodo	39
3.2	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS	40
3.2.1	Dimensionamento do digestor	41
3.2.2	DQO _b	43
3.2.3	Eficiência de remoção de SSV	43
3.2.4	Carga de DBO na entrada e saída do digestor	44

3.2.5	Produção de tecido celular	44
3.2.6	Produção de biogás	45
3.2.7	Potência para aquecimento do reator	46
3.2.8	Potência térmica do biogás	49
3.2.9	Potência elétrica do Biogás	50
3.3	ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO	51
3.3.1	Secagem térmica do lodo digerido	52
3.3.2	Secagem térmica do lodo bruto	55
3.3.3	Potência térmica do lodo	56
3.3.4	Potência elétrica do lodo bruto	57
3.4	INFORMAÇÕES ADICIONAIS PARA A ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS...	61
3.4.1	Redução da massa de lodo no digestor	61
3.4.2	Redução da massa de lodo após a secagem térmica.	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOGÁS	63
4.2	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO LODO	64
4.3	COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS E ALTERNATIVAS	66
5	CONCLUSÃO	67
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	68
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população e a ampliação no atendimento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto no país e em todo o mundo se expande também a problemática quanto ao tratamento e destinação do lodo de esgoto.

Considerando que 53,2% da população brasileira possui ao menos coleta esgoto(MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019), haverá o crescimento no volume de lodo a ser tratado e destinado para os próximos anos. Para evitar que haja o sobrecarregamento dos aterros sanitários, que atualmente é principal meio de disposição do lodo no país, é necessário a busca por novas soluções.

Tecnologias para o aproveitamento do lodo de esgoto na agricultura e na construção civil vem sendo estudados e executados no país e no mundo, trazendo benefícios a população e ao meio ambiente.

Uma das alternativas ainda pouco exploradas em todo o mundo é a recuperação energética a partir do lodo de esgoto. Tecnologias como a incineração, pirólise e gaseificação assim como a produção e utilização do biogás proveniente da decomposição da matéria orgânica em estações de tratamento de esgoto são algumas das opções para geração de energia elétrica e térmica.

A tratativa de que um resíduo até então considerado um rejeito possa não só ser reaproveitado como trazer benefícios econômicos ambientais e sociais torna a recuperação energética extremamente atrativa para investimentos públicos e privados no setor.

1.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar alternativas para recuperação energética a partir do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o potencial de energia a partir da produção de biogás
- Analisar o potencial de energia através da queima do lodo de esgoto
- Comparar os processos e alternativas em uma estação de tratamento de esgoto

2 REFERENCIAL

2.1 ÁGUAS RESIDUÁRIAS

As águas residuárias segundo Raschid-Sally e Jayakody (2008 apud WWAP, 2017, p. 17) são caracterizadas como a combinação de esgotos doméstico, comercial, institucional, industrial, águas pluviais e de atividades agropecuárias.

Essas águas residuárias provêm do uso humano dos recursos hídricos, como às águas negras, provenientes da excreta humana, urina e fezes, das águas cinzas, referente a limpezas em geral e banhos. Também são consideradas nestas as águas utilizadas em ambientes públicos, às águas utilizadas na produção e limpeza de indústrias e das atividades pecuárias e agrícolas incluindo as águas que escoam pela superfície já que estas podem carregar nutrientes e pesticidas devido ao seu uso excessivo.

O lançamento inadequado das águas residuárias no meio ambiente contamina as águas superficiais, os aquíferos e o solo. Essa contaminação afeta a disponibilidade de água limpa para consumo e gera a eutrofização de corpos hídricos, o que afeta não só a saúde humana, como também a disponibilidade de alimentos e aspectos econômicos e sociais.

Estimasse que em 2012 a contaminação da água de consumo causou a morte de 842.000 pessoas em países de média e baixa renda. (WHO, 2014 apud WWAP, 2017, p. 41). Por isso a importância da destinação e tratamento de forma correta do esgoto.

No Brasil os índices de atendimento de coleta das águas residuárias em 2018 foram de 53,2% da população e deste percentual 74,5% passa por algum processo de tratamento (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

2.2 TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Para evitar a contaminação das águas e reduzir a proliferação de doenças, proporcionando melhor bem-estar a população é necessário a realização do tratamento das águas residuárias.

O tratamento do esgoto pode acontecer das seguintes formas: (i) coletiva aonde o efluente de diversos locais é canalizado e transportado até uma estação de

tratamento fora do local de geração, ou, (ii) individual aonde o efluente é tratado no próprio local de geração. Para residências é muito comum o uso de fossas sépticas, ao qual devem ser esvaziadas periodicamente.

Quanto ao efluente industrial este normalmente é tratado no local, podendo ser lançado na rede coletiva desde que atenda a parâmetros específicos ditados pela companhia de saneamento da região.(WWAP, 2017, p. 42)

Nos sistemas coletivos, as redes coletoras podem ser classificadas pelos dois seguintes tipos: (i) rede unitária ao qual as águas residuárias e as águas pluviais são coletadas e encaminhadas para tratamento em uma mesma rede, (ii) sistemas separados aonde as águas pluviais e residuárias possuem rede coletora individual para cada uma das águas.(TCHOBANOGLIOUS et al., 2016, p. 9).

A vantagem do sistema separado é a redução no volume de esgoto a ser tratado, além disso se reduz os impactos gerados pelo grande volume de água e detritos em curtos períodos advindos das tempestades. A desvantagem está na ligação irregular de esgoto nas redes pluviais e escoamento de resíduos depositos sobre o solo para redes pluviais durante as chuvas o que acarreta no escoamento dessas águas residuárias diretamente para os corpos hídricos sem prévio tratamento.(WWAP, 2017, p. 42)

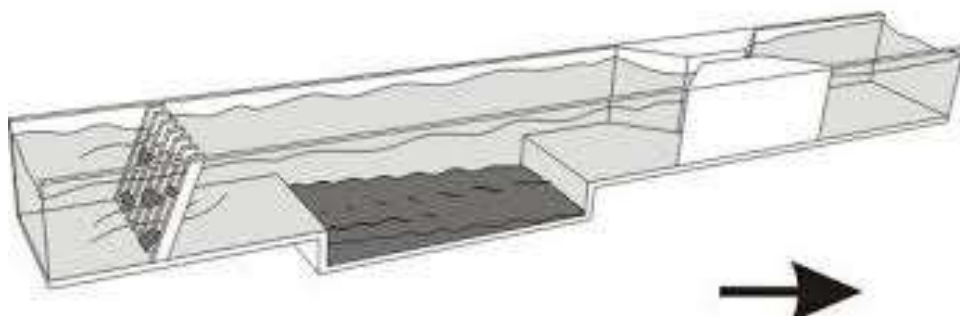
2.2.1 Processos de tratamento

O tratamento das águas residuárias é normalmente definido em níveis de tratamento.

2.2.1.1 Tratamento preliminar

O mais simples o tratamento preliminar tem objetivo da remoção de materiais grosseiros, como trapos, areia, materiais graxos. Esse processo é usado usualmente como a primeira etapa nas estações de tratamento de esgoto e tem por objetivo retirar materiais que possam ser prejudiciais as etapas posteriores de tratamento como também as suas estruturas e equipamentos.

Figura 1 – Exemplo de tratamento preliminar.



Fonte: DIELLE, 2014

2.2.1.2 Tratamento primário

O tratamento primário visa a remoção de parte dos sólidos suspensos e de matéria orgânica presentes no efluente através de processos físicos e químicos, a unidade comumente utilizada nesta etapa em estações de tratamento de esgoto doméstico é o decantador primário conforme Figura 2.

Figura 2 - Decantador



Fonte: Casan, 2015

2.2.1.3 Tratamento secundário

No tratamento secundário tem-se por objetivo a remoção da matéria orgânica biodegradável e de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo através de processos biológicos.

A remoção destes componentes do efluente é realizada através do metabolismo de microrganismos, principalmente de bactérias. Esses microrganismos promovem a oxidação dos compostos transformando-os em produtos simples e biomassa(TCHOBANOGLIOUS et al., 2016, p. 538).

Esses microrganismos se dividem nos três seguintes grupos: (i) os microrganismos aeróbios que se utilizam de oxigênio dissolvido para os seus processos metabólicos, (ii) os microrganismos anóxicos que utilizam-se de nitrato ou nitrito, para seus processos metabólicos e (iii) os microrganismos anaeróbicos que se utilizam de vários aceptores de elétrons na ausência de oxigênio para produção de energia.

Os sistemas de tratamento de esgoto secundários se baseiam na reprodução da degradação natural da matéria orgânica. Nesses sistemas se fornece condições ideais de temperatura, pH e nutrientes para o desenvolvimento dos microrganismos. Os principais nutrientes necessários para o desenvolvimento dos microrganismos são nitrogênio (N), enxofre (S), fósforo (P), potássio(K), magnésio(Mg), cálcio(Ca), ferro(Fe), sódio(Na), cloro (Cl) e a matéria orgânica carbonácea(Madigan et al., 2012 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016).

2.2.1.4 Tratamento terciário e avançado

No nível terciário ocorre a remoção de sólidos suspensos residuais e outros compostos específicos, como metais pesados e compostos recalcitrantes. Dentre os processos realizados durante esta etapa encontram-se a adsorção por carvão ativado, a microfiltração, a cloração e alguns processos avançados como a osmose reversa e a oxidação do tipo Fenton.

2.2.1.5 Conjunto de tratamentos

O que determina qual o conjunto de etapas presentes em uma estação de tratamento de esgoto são as características da água residual e do local de lançamento do efluente tratado.

No Brasil esses padrões são definidos pela Resolução 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que define os parâmetros de lançamento de efluentes e pela resolução 357 de 2005 do Conama que define a classificação das águas superficiais no país.

É importante levar em consideração o local de lançamento para que o ambiente que receba o efluente tratado seja capaz de o absorver sem que ocorra sua degradação e é este fato que influenciará no quão avançado será a remoção dos compostos presentes nas águas residuárias.

2.3 LODO DE ESGOTO

No processo de degradação da matéria orgânica e nutrientes em estações de tratamento de esgoto há a formação de um subproduto denominado lodo. O lodo produzido em geral possui característica líquida ou de semissólido, contendo entre 0,25 a 12% de sólidos(LARA *et al.*, 1999)

Os sólidos que compõe o lodo são de origem da matéria orgânica e inorgânica presentes nas águas residuárias. O lodo precisa ser removido de forma frequente para evitar seu acúmulo dentro dos sistemas de tratamento de esgoto, já que pode acarretar a redução da eficiência do tratamento.

O lodo removido é bombeado para processamento em uma ou mais etapas dentro da ETE. Lodos de diferentes etapas de tratamento podem ser tratados separadamente ou misturados. As etapas mais comuns de processamento são o adensamento, a estabilização e o desaguamento. Em algumas unidades pode possuir até mesmo a trituração e ou peneiramento do lodo para remoção de materiais fibrosos que possam ter escapado durante a fase de tratamento preliminar.

2.3.1 Adensamento

O adensamento tem como objetivo a remoção de parte da humidade do lodo, visando a redução no volume a ser processado e tratado. Isto implica em redução nos sistemas de bombeamento e processamento, reduzindo significativamente os custos de instalação e operação. Como exemplo, o excesso de lodo removido de sistemas de lodo ativado possui concentração de sólidos típica na casa de 0,8%, com o adensamento pode-se conseguir valores de até 4%. Isto implica na redução de cinco vezes o volume a ser bombeado e processado. (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016, p. 1459)

O adensamento pode ocorrer em etapas existentes do tratamento como nos decantadores primários, digestores ou em unidades específicas para o tratamento. Segundo Tchobanoglous et al. (2016) em estações com capacidade inferior a 4.000 m³/dia não é comum a realização do adensamento em unidades específicas, sendo normalmente justificadas para ETEs de grande porte onde o melhor controle e maiores concentrações de sólidos compensam o investimento.

2.3.2 Estabilização

Os processos de estabilização do lodo têm como objetivo a redução da concentração de patógenos, reduzir maus odores e o potencial de putrefação. Além disso alguns processos de estabilização podem resultar na diminuição de volume do lodo e na produção de gás metano.

2.3.2.1 Compostagem

O processo de compostagem é a decomposição da matéria orgânica realizada por microrganismos preferencialmente em presença de oxigênio que eleva a temperatura do meio entre 50 a 65°C, podendo alcançar picos de 70°C. Este processo nada mais é que a reprodução de um processo natural de decomposição em um ambiente controlado permitindo a decomposição dos resíduos e redução dos patógenos o mais próximo do ideal teórico. (INÁCIO; MILLER, 2009, p. 31)

A compostagem possui grupos variados de microrganismos classificados principalmente em dois grupos os mesófilos, que possuem atividade ótima até 45° C e os termófilos que atuam em uma faixa de 45 a 75° C.

A temperatura influencia no metabolismo dos microrganismos e possui influência no fluxo de ar já que as diferenças de temperatura dentro da leira causam um movimento de convecção que fazem o oxigênio e o vapor de água circularem dentro das leiras.

Os microrganismos utilizam o oxigênio para degradação dos compostos orgânicos para obterem energia e liberam gás carbônico CO₂, água e geram calor (INÁCIO; MILLER, 2009, p. 31–33)

O processo se divide em quatro fases. (i) A fase inicial aonde os microrganismos têm uma rápida proliferação aumentando a decomposição da matéria orgânica e elevando a temperatura interna da leira podendo levar de 15 horas até 3 dias. (ii) A fase termófila onde as temperaturas superam os 45° C é aonde os microrganismos termófilos tem maior proliferação e ocorre o maior aumento da temperatura interna da leira. (iii) A fase mesófila é aonde ocorre a redução da temperatura, a degradação de compostos orgânicos complexos e o aumento na quantidade de fungos e actinomicetos. (iv) A fase de maturação é aonde ocorre a formação de substâncias húmicas e o composto perde a capacidade de elevação de sua temperatura, portanto tendo a sua atividade biológica reduzida. (INÁCIO; MILLER, 2009)

2.3.2.2 Higienização alcalina

A higienização alcalina ou calagem ocorre através da adição de cal virgem em proporções de 30 a 50% do peso seco do lodo para que ocorra a desinfecção.

A desinfecção ocorre devido à elevação da temperatura e pH, já que ao contato do cal com água contida no lodo ocorre uma reação exotérmica liberando calor ao meio fazendo com que a temperatura se eleve até sua estabilização.

Para que isso ocorra é necessário que o lodo possua ao menos 70% de umidade. A alteração de pH também é um dos fatores desinfetantes já que a mistura faz com que o pH se eleve a números próximos a 12 onde ocorre a inativação dos patógenos. Recomenda-se que o lodo fique armazenado por um período de pelo menos 60 dias o que geralmente acarreta a redução total da viabilidade de ovos de

helminthos, estes que tem maior tempo de vida em condições normais.(LARA *et al.*, 1999)

2.3.2.3 Solarização

A solarização é um método de desinfecção desenvolvido para controlar patógenos, plantas daninhas e pragas no solo. Neste método se realiza a cobertura do solo úmido com filme plástico transparente antes do plantio e durante o período de maior radiação solar. Isso faz com que a temperatura no solo seja elevada, alcançando temperaturas entre 49 a 54° C nas camadas superficiais, em torno de 10cm, ocorrendo assim a morte dos patógenos e ervas daninhas(TERRA DA AGRICULTURA, 2012)

A cobertura é realizada enterrando-se as bordas do filme plástico em sulcos no solo após uma chuva ou irrigação e deve ser aplicado por um período de 04 a 06 semanas.(GHINI, 2001)

Para o lodo de esgoto o método pode ser aplicado em leitos de secagem e é possível obter a remoção de 100% em ovos de helmintos e cistos de protozoários em uma profundidade de 05 cm em 15 dias de exposição.(Bueno, 2006 *apud* ALVES FILHO, 2014)

2.3.2.4 Digestão aeróbica

A digestão aeróbica é um processo similar ao sistema de tratamento de lodo ativado. O lodo com concentrações de até 4% de sólidos entra no reator e é constantemente movimentado e aerado. Para garantir a sua estabilização e remoção dos patógenos presentes o sistema pode operar com tempo de permanência entre 40 a 60 dias a depender da temperatura de trabalho.

Esse processo é normalmente utilizado por ETEs com vazões de até 0,2 m³/s e pode ser encontrada em ETEs com até 2 m³/s de vazão. Na prática é possível obter a redução de 35 a 50% dos sólidos suspensos voláteis presentes no lodo, sendo que em sua constituição o excesso de lodo do processo de lodo ativado possui cerca de 65 a 75% de sua massa é biodegradável.

No entanto a necessidade de energia para aeração e revolvimento do lodo no reator e a não geração de biogás para recuperação energética, torna o processo

menos atraente. Outro fator é a limitação do processo quanto a remoção de patógenos que tende a não atender a legislação brasileira para uso em solo agrícola.

Reatores aeróbios modernos operam hoje na condição termofílica, onde as temperaturas atingem entre 50 a 75°C. Para isso os reatores são termicamente isolados e a temperatura se eleva com a própria atividade biológica, o que permite um menor tempo de detenção e atingir os padrões nacionais para higienização do lodo.

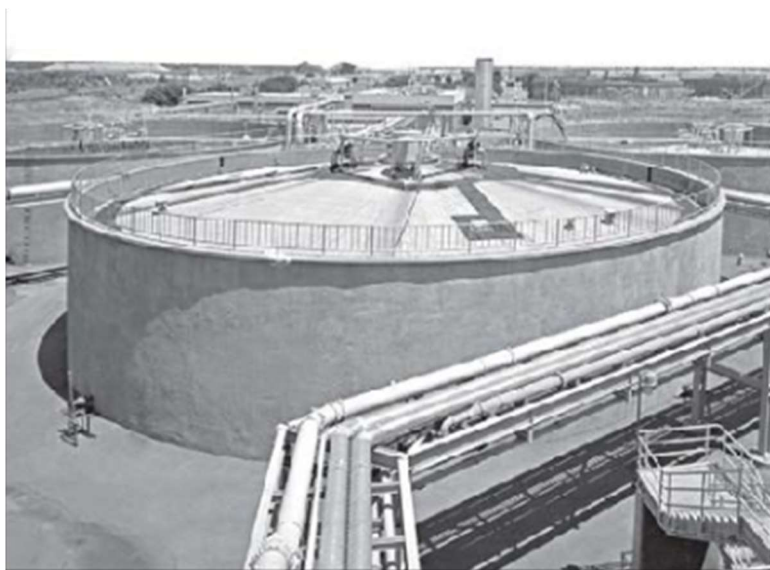
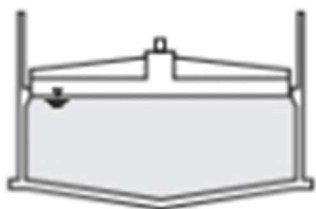
Além disso segundo Pevec (2010 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016) pode-se atingir valores de remoção de sólidos voláteis de em torno de 57% e uma massa com boa capacidade de desaguamento. Esses sistemas, porém, necessitam de maiores controles operacionais devido a formação de espumas e para garantir a qualidade do lodo digerido.

2.3.2.5 Digestão anaeróbica

O processo de digestão anaeróbica trata-se da decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Segundo Tchobanoglous et al(2016) o processo de digestão anaeróbica é o processo de estabilização de lodo mais antigo e mais utilizado. A capacidade de geração de biogás e a boa capacidade de redução na quantidade de sólidos voláteis durante o processo é um dos grandes atrativos da digestão anaeróbica.

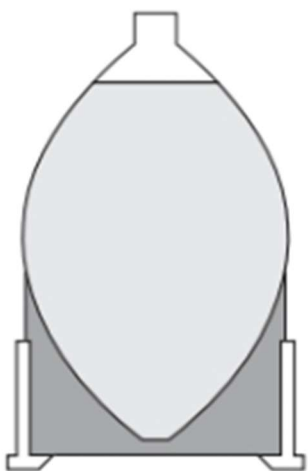
Os digestores anaeróbicos em geral possuem estrutura cilíndrica com fundo inclinado, devendo ser cobertos, seja por uma cobertura fixa ou flutuante. Projetos mais recentes vem sendo construídos com cobertura e fundo com inclinação elevada o que facilita a mistura e elimina a necessidade de limpeza devido ao acúmulo de detritos.

Figura 3 – Exemplo de reator anaeróbico cilíndrico com cobertura flutuante



Fonte: TCHOBANOGLIOUS et al., 2016

Figura 4 – Exemplo de reator anaeróbico oval



Fonte: TCHOBANOGLIOUS et al., 2016

Para o correto funcionamento do processo de digestão anaeróbica é necessário que se controle fatores como o tempo de retenção sólidos (TRS), a temperatura, a alcalinidade, o pH, nutrientes e micronutrientes necessários e a presença de substâncias que possam inibir o desenvolvimento biológico.

O Tempo de retenção de sólidos se refere o tempo que os sólidos permanecem no reator. Este tempo varia entre 10 a 20 dias dependendo do tipo e construção do reator. Esse tempo é necessário para garantir as três fases de decomposição anaeróbica: (i) a hidrólise, que é a solubilização dos compostos

orgânicos; (ii) a fermentação ou acidogênese onde ocorre a formação de compostos orgânicos de cadeia molecular curta; (iii) a metanogênese onde ocorre a conversão desses compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono.

A temperatura influencia no metabolismo dos microrganismos que fazem a digestão da matéria orgânica. Em geral uma maior temperatura acelera o processo de digestão. Boa parte dos digestores opera na faixa de 30 a 38°C onde as bactérias mesofílicas operam com maior eficiência. Existem reatores que operam na faixa dos 50 a 57°C onde as bactérias termofílicas tem maior influência. Sistemas atuais podem utilizar a combinação de ambos os métodos pelo arranjo de reatores.

Para o desenvolvimento controlado da digestão anaeróbica são necessários a mistura uniforme do lodo, o controle de sua temperatura, e o controle do adensamento do lodo da entrada. A mistura do lodo pode ser garantida através da recirculação de gás, de recirculação do lodo por bombeamento ou por misturadores por aspersão. Segundo Clark e Ruehrwein (1992 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016) os sistemas de mistura devem ser projetados para que o conteúdo do tanque circule pelo menos 10 vezes ao dia.

O adensamento do lodo permite o aumento da carga nos digestores, o que permite a redução do seu tamanho e segundo Maco et al (1998 TCHOBANOGLIOUS et al., 2016) a utilização de lodo adensado permite o aumento da produção de gás e reduz o tempo de detenção hidráulico.

O Aquecimento do digestor toma como base a energia necessária para o aquecimento do lodo que entra no digestor e para as perdas de calor nas superfícies de contato com o lodo, como as tubulações, as paredes e coberturas do digestor que perdem calor para o meio externo. O aquecimento pode ser realizado pela circulação do lodo do digestor por um trocador de calor externo.

Para o cálculo da energia necessária para manutenção de temperatura no digestor segundo Tchobanoglous et al (2016) se admite que a capacidade calorífica do lodo é a mesma que a da água e as perdas energéticas podem ser calculadas utilizando a equação (1).

$$q = UA(\Delta T) \quad (1)$$

Sendo,

q = Calor perdido [J/s]

U = coeficiente global de transferência de calor, $[J/m^2s^{\circ}C]$

A = área onde ocorre a perda de calor $[m^2]$

ΔT = Diferença de temperatura entre os dois lados da superfície de calor, $[^{\circ}C]$

O cálculo das perdas deve ser realizado em separado para cada um dos diferentes materiais de superfície onde ocorre a troca de calor, já que estes possuem diferentes coeficientes de transferência conforme Tabela 01.

Tabela 01– Valores típicos de coeficientes de transferência de calor

Item	Coeficiente de transferência de calor $[W/m^2.^{\circ}C]$
Parede de concreto 300 mm, sem isolamento térmico	4,7 - 5,1
Parede de concreto 300 mm, com isolamento térmico	0,6 - 0,8
Piso de concreto 300 mm em solo úmido	2,85
Piso de concreto 300 mm em solo seco	1,7
Cobertura flutuante com isolamento	0,9 - 1,0
Cobertura de concreto fixa 100mm sem isolamento	4,0 - 5,0
Cobertura de concreto fixa 100mm com isolamento	1,2 - 1,6

Fonte: TCHOBANOGLOUS et al., 2016

2.3.2.5.1 Geração de biogás

O biogás produzido nos digestores tem bom potencial térmico possuindo potencial calorífico inferior segundo Noyola et al.(2006 apud ROSA, 2013) de $21,5 MJ/m^3$ para biogás contendo 60% de metano. Em geral o biogás é composto em sua maioria por metano e dióxido de carbono e contém em menores concentrações nitrogênio, hidrogênio e sulfeto de hidrogênio.

A geração de biogás é estimada a partir da redução da quantidade de sólido voláteis no biodigestor com valores variando entre 0,75 a $1,12 m^3/kg$ de sólidos voláteis destruídos.

O biogás pode ser utilizado para cogeração de energia ou como combustível para caldeiras para geração de vapor ou água quente, que pode ser utilizada para o aquecimento do digestor ou de outras fontes. Com a purificação é

possível até mesmo o uso em substituição ao gás natural podendo ser utilizado em veículos ou vendido para distribuição.

Pela existência de sulfeto de hidrogênio, nitrogênio e partículas e vapor de água é necessário que ocorra um mínimo tratamento para utilização do biogás.

A umidade presente pode ser removida através da condensação, normalmente realizada nas tubulações que deve apresentar purgadores e ou tanques de acúmulo instalados.

O sulfeto de hidrogênio presente no biogás pode danificar as tubulações e equipamentos que o utilizam. Isso ocorre pela diluição do sulfeto de hidrogênio na água condensada que resulta em um subproduto que é a solução de ácido sulfúrico. Por isso se faz necessário a utilização de tubos em aço inoxidável ou ferro fundido nodular com revestimento interno que são mais resistentes a corrosão e a erosão que possam ser causadas pelo ácido formado.

Para a maioria dos usos há em geral suficiente remoção do sulfeto de hidrogênio durante a condensação e purga da umidade, porém pode ser necessária uma maior frequência na manutenção dos tubos e equipamentos devido a presença do sulfeto residual. Segundo Tchobanoglous et al (2016) alguns dos processos utilizados para a remoção do sulfeto residual podem ser a oxidação em fase líquida, lavadores, sistemas biológicos, sistemas químicos, carvão ativado ou resinas absorvedoras. É comum também o uso de lascas de madeira envolvidas em lã de aço onde ocorre a formação de sulfeto de ferro, podendo ser possível a recuperação e a reutilização do ferro no local.

2.3.3 Desaguamento

A presença de grande quantidade de água no lodo faz com que haja um grande volume a ser destinado a um fim adequado, elevando os custos de disposição, além de facilitar a percolação do material aumentando os riscos de contaminação do solo e do lençol freático. Por isso é necessária a etapa de desaguamento.

O desaguamento do lodo pode ser realizado diretamente após a sua retirada da estação de tratamento de esgoto (ETE), ou passar por uma etapa de digestão. A digestão é realizada para redução na quantidade de sólidos suspensos voláteis presentes na massa de lodo. Isso se deve já que alguns tipos de tratamento,

como o lodo ativado, não realizarem uma maior mineralização do lodo ainda dentro do sistema.

Lodos de lagoas de estabilização por exemplo, já se encontram mais mineralizados devido ao seu grande tempo de permanência dentro do sistema, podendo levar até períodos de 20 a 25 anos antes de sua remoção. Enquanto que no sistema de lodo ativado a idade do lodo gira em torno de 4 a 10 dias.(FERNANDES; SILVA, 1999)

2.3.3.1 Secagem natural

O processo de secagem natural trata-se da disposição do lodo em cima de uma camada permeável, como a areia, aonde a água que se desprende do lodo percola com facilidade. Removendo-se assim parte da água em menos de um dia. Logo em seguida a esta etapa a água presente no lodo em estado semissólido é eliminada através da evaporação. Esse processo faz com que o lodo reduza de tamanho tanto em altura como em suas dimensões laterais provocando rachaduras, conforme Figura 5 que aceleram o processo de evaporação.(NETTO et al., 1997)

Figura 5 – Lodo em processo de secagem



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

Este processo pode ser realizado em leitos de secagem, que constituem em caixas com camadas de brita e areia aonde o percolado é coletado por um sistema

de drenagem e redirecionado a ETE. O lodo após período de 15 a 25 dias pode ser removido com teor de umidade entre 40 a 75%.(LARA *et al.*, 1999)

Outra forma de se realizar o processo é por lagoas de lodo que armazenam o lodo digerido até sua secagem. Este processo pode levar de 03 a 06 meses dependendo da variação na ocorrência de chuvas, este sistema pode ou não possuir sistemas de drenagem.(LARA *et al.*, 1999)

2.3.3.2 Secagem mecânica

O processo de secagem mecânica utiliza-se de equipamentos para o desaguamento do lodo de esgoto, esses processos normalmente têm maior custo de operação e manutenção, porém requerem uma área muito menor do que os processos de secagem natural que podem se tornar inviáveis dependendo de sua localização e capacidade de tratamento.

Estes processos em geral requerem o adensamento e condicionamento químico para que haja a aglomeração das partículas tornando-as mais facilmente desidratáveis e mudam conforme a composição físico química e da estrutura do lodo a ser desaguado.(LARA *et al.*, 1999, p. 23)

Entre os principais processos está a centrifugação que usa o aumento da força gravitacional realizado pela alta rotação do sistema. A centrifuga opera entre 4.000 a 6.000 rotações por minuto (rpm) e pode gerar lodos com teor de umidade entre 70 a 80% em um processo contínuo. Outro sistema bastante utilizado é o filtro prensa que se constitui em várias placas filtrantes que são comprimidas hidráulicamente forçando a expulsão da água, com pressões de trabalho variando entre 690 a 1.730 kPa, com tempo de compressão variando entre 30 a 180 minutos conseguindo lodos com 40 a 50% de umidade, porém o sistema opera por batelada.(NETTO *et al.*, 1997, p. 379–384)

2.3.3.3 Secagem térmica

Segundo David (2002) a secagem térmica consiste na remoção da umidade por meio da evaporação de água a um meio insaturado com o uso de calor. Segundo Tchobanoglous (2016) os altos custos de instalação e operação do sistema, principalmente devido a necessidade de fontes de combustível e profissionais

especializados para operação, o método ainda não é comumente difundido entre as estações de tratamento em todo o mundo.

A grande vantagem da secagem térmica se encontra na alta capacidade de redução da quantidade de água presente no lodo, podendo produzir um biossólido com teores de umidade de apenas 5% a 10% (DAVID, 2002, p. 43). Reduzindo assim os custos associados ao transporte e disposição final devido à grande redução de massa e volume a ser destinado.

Outra vantagem que ocorre pela utilização de temperaturas elevadas no sistema é a destruição ou inativação de microrganismos patogênicos que possam estar presentes na massa de lodo. Isto torna o lodo propício para utilização na agricultura atendendo a suas normas regulamentadoras.

2.3.3.3.1 Métodos de transferência de calor

Dentre os métodos de secagem térmica encontram-se os secadores diretos e os secadores indiretos. Suas denominações ocorrem a partir do método de transferência de calor.

Os secadores diretos realizam a transferência de calor através da convecção, onde o fluido aquecido entra em contato diretamente com o lodo. A taxa de transferência de calor pode ser calculada através da equação (2) (WEF, 2010 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016).

$$q_{conv} = h_c A (T_g - T_s) \quad (2)$$

Sendo,

Q_{conv} = Taxa de transferência de calor por convecção [kJ/h]

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção, [kJ/m²h°C]

A = área da superfície aquecida [m²]

T_g = temperatura do gás, [°C]

T_s = Temperatura na interface entre o lodo e o gás [°C]

Segundo David (2002) a principal vantagem do secador direto é a alta transferência de calor devido ao contato direto entre as partículas de lodo e o meio de transferência. Isso faz com que o tempo de residência dentro destes sistemas

possam atingir valores menores do que 01 minuto em alguns tipos de secadores. Porém isso acarreta, segundo Frost (1990 apud DAVID, 2002), na necessidade de um alto controle nas condições do sistema para assegurar a destruição dos microrganismos patógenos.

Outra desvantagem ocorre da grande formação de material particulado fino que em contato com os gases quentes pode gerar a ignição do lodo seco levando a ocorrência de incêndios ou explosões.

Nos secadores indiretos o lodo se encontra separado da fonte de calor por uma parede metálica. A energia é proveniente do vapor saturado ou do óleo térmico e é transferida ao lodo pela parede metálica pelo processo de condução. A taxa de transferência de calor deste método pode ser calculada através da equação (3)(WEF, 2010 apud TCHOBANOGLOUS et al., 2016).

$$q_{cond} = kA(T_m - T_s) \quad (3)$$

Sendo,

Q_{cond} = Taxa de transferência de calor por condução [kJ/h]

k = Coeficiente de transferência de calor por condução, [kJ/m²h°C]

A = área da superfície aquecida [m²]

T_m = temperatura do fluido de aquecimento, [°C]

T_s = Temperatura do lodo na superfície de troca térmica [°C]

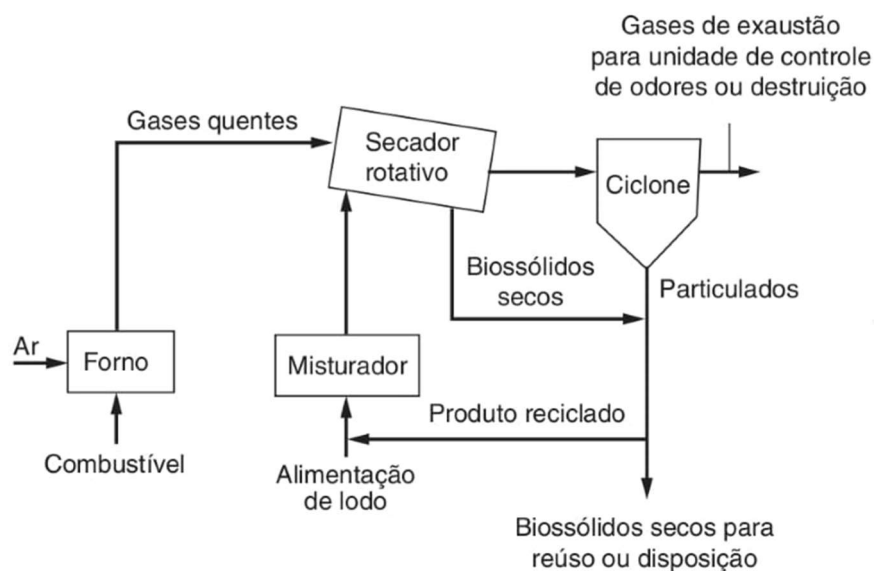
Nos sistemas indiretos o vapor produzido pelo lodo é removido por uma corrente de ar, esta que pode ser realizada pela redução da pressão interna através de um exaustor. Isso auxilia na remoção da umidade do lodo através da corrente de ar evitando a condensação do vapor.

2.3.3.3.2 Secador térmico rotativo

O secador térmico rotativo é um cilindro em chapa de aço apoiado sobre mancais rotativos que possui seu eixo longitudinal com leve inclinação conforme Figura 76. O lodo, que adentra o sistema de forma contínua, é revolvido por misturadores instalados nas paredes internas do cilindro. Isto faz com que ocorra a diminuição das partículas aumentando a área de contato com os gases aquecidos que

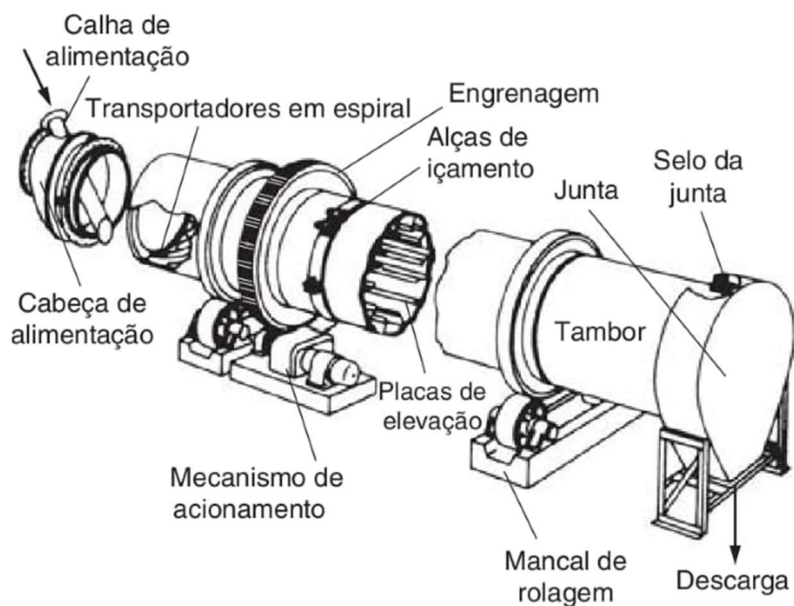
adentram o sistema aumentando a eficiência de secagem e gerando um produto em forma de pellets.

Figura 6 - Fluxograma de um secador rotativo



Fonte: (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016)

Figura 7 - Detalhe de um secador rotativo



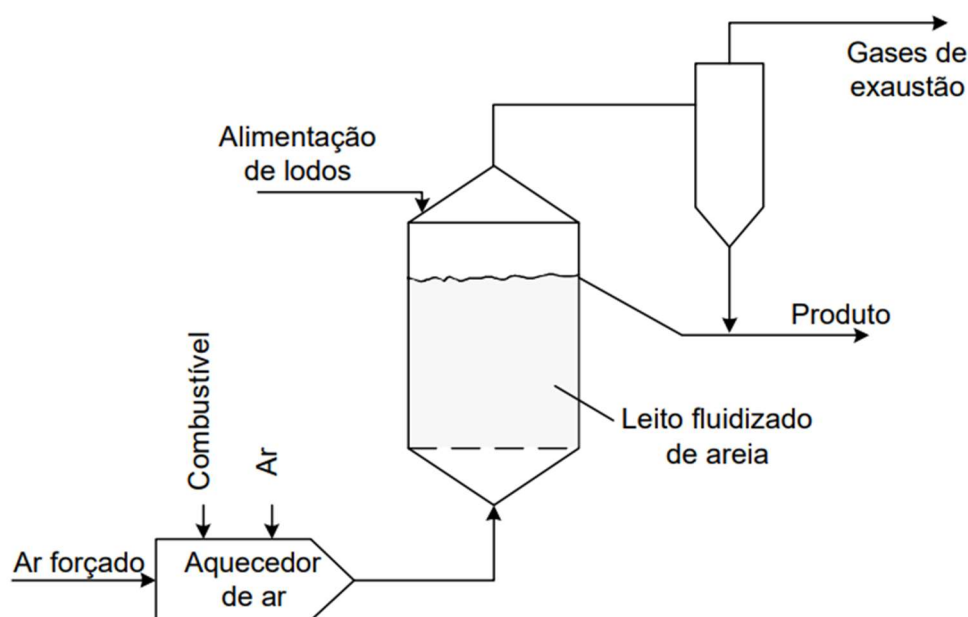
Fonte: (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016)

2.3.3.3.3 Secador térmico de leito fluidizado

O secador térmico de leito fluidizado opera com a suspensão do lodo através da corrente de ar quente que é pressurizada no fundo do secador. Essa corrente de ar atravessa um fundo perfurado que distribui o ar de forma uniforme pelo secador fazendo com que se misture e se suspenda as partículas de lodo, realizando assim a transferência de calor com alta eficiência. O lodo e os gases gerados são extraídos na parte superior do secador.

A temperatura interna é mantida em torno dos 85 a 120 °C, como esse processo opera com temperaturas relativamente baixas este processo pode ser utilizado para a recuperação de calor residual de outras fontes.

Figura 8 - Fluxograma de um secador de leito fluidizado



Fonte: (TCHOBANOGLOUS et al., 2016)

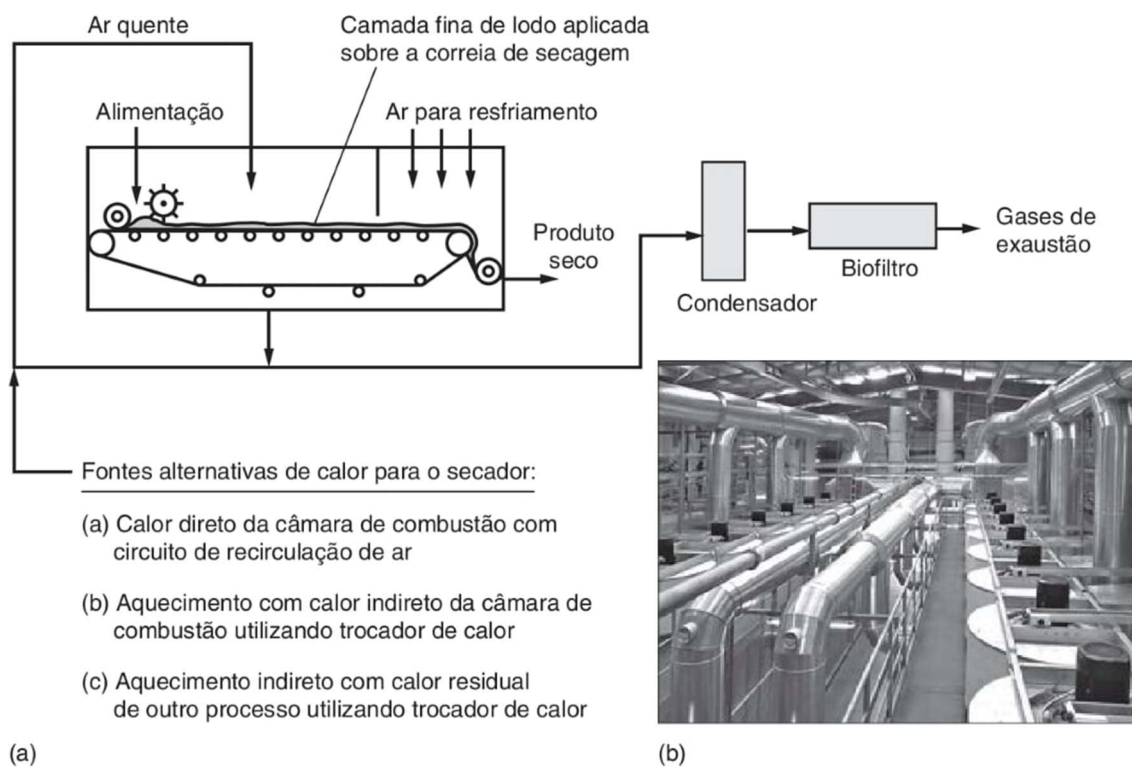
2.3.3.3.4 Secador térmico de esteira

Os secadores térmicos de esteira ou de correia são sistemas fechados onde o lodo é depositado continuamente sobre uma esteira que transporta o lodo pelo secador aonde ar quente entra em contato com o biossólido realizando a sua secagem. A esteira pode ser construída de material metálico perfurado ou de tecido similar aos utilizados nos filtros prensa.

O lodo pode ser extrudado em tiras sobre a esteira de forma a garantir uma maior área de contato e uniformidade na transferência de calor conforme a figura 10. Para extrusão é necessário que o lodo possua teor de umidade superior a 70%.

Nos secadores de correia o meio de transferência de calor pode ser proveniente de gases de exaustão de fornos ou motogeradores ou pelo ar aquecido de forma indireta. O sistema pode operar com baixas temperaturas em torno de 70 a 140 °C tornando-se boa opção quando há calor residual de alguma operação dentro da ETE.

Figura 9 - Fluxograma Secador de Esteira



Fonte: (TCHOBANOGLOUS et al., 2016)

Figura 10 - Lodo sendo extrudado



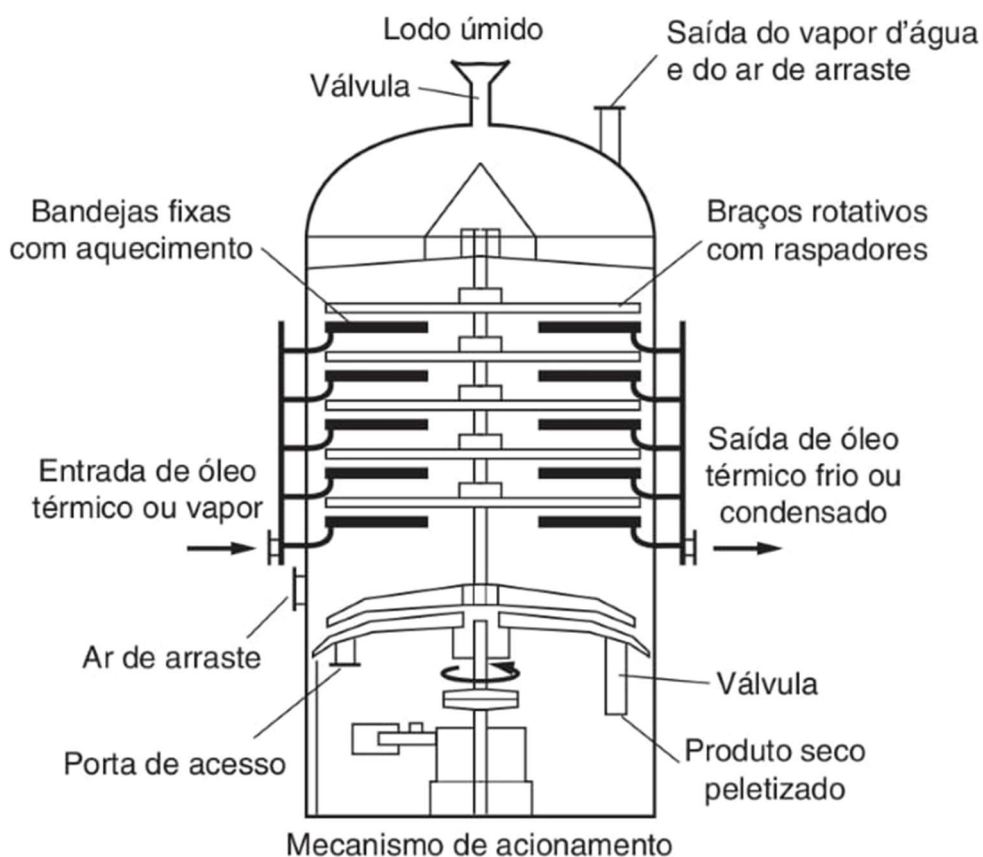
Fonte: (TCHOBANOGLOUS et al., 2016)

2.3.3.3.5 Secador térmico de soleiras múltiplas

O secador térmico de soleiras múltiplas consiste em um cilindro vertical contendo múltiplas soleiras metálicas que são aquecidas internamente. Este sistema realiza a transferência de calor através de método indireto por condução.

O lodo entra no sistema pela parte superior onde cai sobre a primeira soleira. O lodo então é raspado e empurrado para a soleira seguinte logo abaixo e continua-se com esse movimento repetidas vezes até a parte inferior do secador aonde o lodo seco é removido

Figura 11 - Representação de um secador de soleiras múltiplas



Fonte: (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016)

2.3.3.3.6 Riscos

Os principais riscos associados aos secadores estão relacionados a presença de material particulado fino e lodo com baixíssimo teor de humidade que pode provocar a ocorrência de incêndios e explosões no secador, ou até mesmo no transporte e armazenagem do lodo. Isto ocorre já que partículas orgânicas em suspensão podem entrar em combustão rapidamente se expostas a uma fonte de ignição. Ocorrendo assim a expansão rápida do volume e ou da pressão dos gases gerados e caso a pressão supere a resistência de ruptura da estrutura ao qual está confinada ocorrerá uma explosão. (Haug et al., 1993 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016, p. 1570–1571)

2.3.3.3.7 Controle dos gases

A metodologia de controle de gases varia de acordo com o modelo do secador, de sua fabricante e de exigências específicas do local de instalação. Em geral os processos necessitam da remoção dos particulados e os separadores do tipo ciclone conseguem atingir boa eficiência. Quando há a necessidade de complementação utiliza-se de lavadores de gases aonde o gás é aspergido por água para solubilização dos compostos presentes nos gases.

Na necessidade de remoção de eventuais odores e ou compostos específicos os gases podem ser incinerados ou destinados para queima junto aos aquecedores dos gases do secador caso haja a presença de um. Pode ser realizado ainda pela adição de produtos químicos junto ao lavador de gás.

2.3.4 Destinação do lodo

2.3.4.1 Disposição em solo agricultável

O uso do lodo de esgoto em solo agricultável já é bem conhecido e desenvolvido no Brasil e em outros países. O seu uso no Brasil é regulamentado pela resolução 375 de 2006 do Conama. Ela estabelece critérios e parâmetros máximos para a presença de microrganismos patogênicos, nutrientes, metais pesados e outras substâncias potencialmente tóxicas. Define ainda as possíveis locais e culturas para aplicação e possíveis formas de higienização do lodo para remoção dos agentes patogênicos.

O composto higienizado é grande fonte de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica que condicionam o solo estimulando a microbiota e o controle de pragas além do fornecimento de nutrientes para as plantas.(INÁCIO; MILLER, 2009)

Em experimentos na região de Londrina foram realizados testes com lodo de esgoto compostado nas doses de 20, 40 e 100 t/ha. No solo com 20t/ha a massa verde foi duas vezes superior em relação ao solo de testemunha. Apresentou-se ainda crescimento em doses mais altas e não foram identificados problemas mesmo com a superdosagem.(FERNANDES; SILVA, 1999)

O lodo de esgoto pode não possuir todos os nutrientes necessários para as plantas e deve ser utilizado conforme recomendação de um engenheiro agrônomo. A

aplicação do lodo de esgoto no solo é normalmente realizada em função do nitrogênio necessário no solo. E no caso do lodo higienizado por calagem o pH pode ser o fator limitante para aplicação, para não ultrapassar a neutralidade.(FERNANDES; SILVA, 1999)

2.3.4.2 Disposição em aterro.

A disposição do lodo de esgoto em aterro é uma das alternativas presentes. O lodo de esgoto encaminhado ao Aterro é disposto em uma célula impermeabilizada, onde é compactado e coberto com solo. A prática, no entanto, vem perdendo força pelo fato de que o lodo de esgoto pode ser aproveitado como recurso, tornando-se uma possível fonte de renda ao invés de custo.

Na União Europeia cerca de 13,6% do lodo produzido é disposto em aterro, 42,4% é utilizado na agricultura e 26,9% é incinerado. No entanto com a criação de legislações para melhor reaproveitamento e reciclagem de materiais a disposição do lodo em aterros sanitários será banida em 2025.(Wiechmann et al, 2013 apud ĐURĐEVIĆ; BLECICH; JURIC, 2019)

2.3.4.3 Incineração

O processo de incineração de lodo de esgoto é uma das alternativas de tratamento e destinação final para estações de tratamento de esgoto de médio e grande porte, principalmente quando há a ausência de área para disposição.

A incineração consiste na combustão completa de um resíduo. O lodo de esgoto possui grande quantidade de material volátil que pode sofrer combustão, possuindo potencial calorífico inferior típico de 21 MJ/kgSST para excesso de lodo ativado e 12 MJ/kgSST para lodos digeridos de forma anaeróbica.

A umidade do lodo está diretamente relacionada com a quantidade de energia necessária para a queima do lodo de esgoto e isso pode determinar se o processo pode ser autossustentável ou necessitar de uma fonte adicional de combustível. Segundo Tchobanoglous et al(2016) são necessário de 4 a 5 MJ de energia para evaporar 01 kg de água presentes no lodo, por isso é ideal que o lodo possua ao menos 15% de sólidos para incineradores de múltiplas câmaras e mais do que 25% de sólidos para incineradores de leito fluidizado.

Uma das vantagens da incineração do lodo é a capacidade do aproveitamento do calor excedente para aquecimento de água, ou óleo térmico e a geração de vapor, seja para geração de energia ou aquecimento de edificações durante o inverno em regiões mais frias.

2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA

De acordo com a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE)(2019) a capacidade instalada no país para produção de energia elétrica é de 162,84 GW sendo que deste 60,4% são de usinas hidrelétricas e 24,9% de termelétricas.

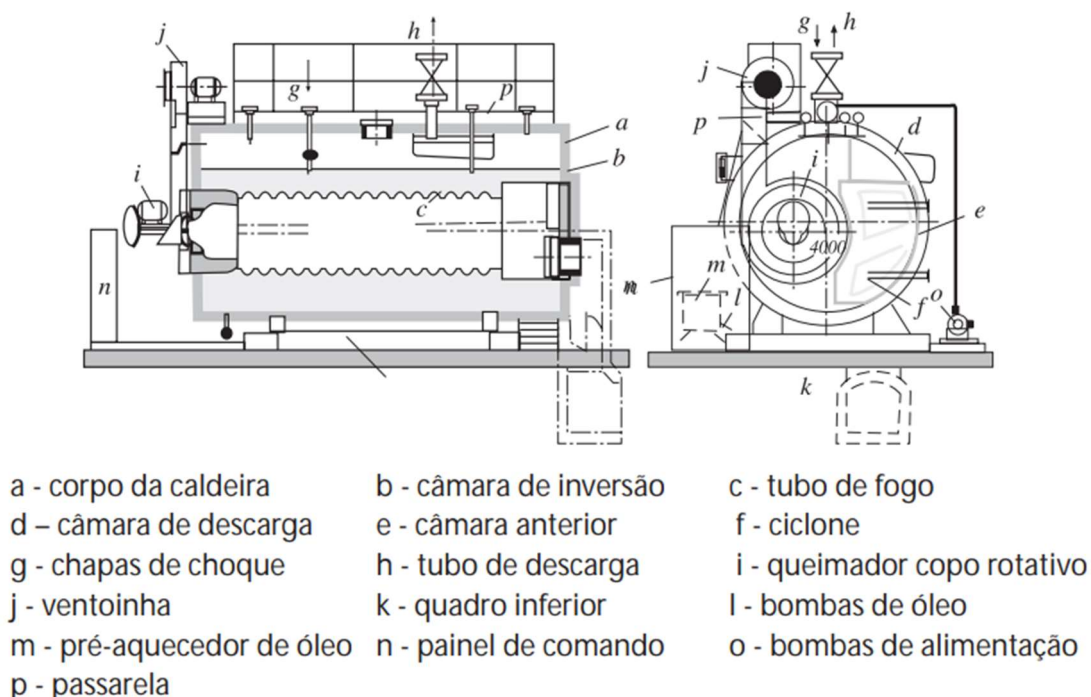
A geração de energia elétrica ainda segundo EPE(2019) em 2018 foi de 601.396 GWh sendo que deste 51.876 GWh ou 8,6% advém da utilização da biomassa. A produção de energia através da biomassa e do biogás vem crescendo nos últimos anos principalmente pelo atrativo econômico onde há o aproveitamento de resíduos para geração de energia e consequentemente de renda.

2.4.1 Caldeira

A caldeira é essencialmente um trocador de calor onde a energia proveniente da queima de um combustível é transferida para um fluido de trabalho. As caldeiras trabalham com pressão superior a atmosférica e elevadas temperaturas, por isso necessitam de componentes que garantam a sua segurança e eficiência como pode ser observado na figura 12.

As fontes de combustível podem ser das mais variadas desde combustíveis sólidos como a lenha e o carvão, combustíveis líquidos como a gasolina ou diesel e gasosos como o gás natural e o biogás, podendo funcionar até mesmo com energia elétrica.(NOGUEIRA, 2005)

Figura 12 – Esquema de caldeira Flamotubular



Fonte: (NOGUEIRA, 2005)

2.4.2 Turbina a vapor

O vapor proveniente da caldeira pode ser transformado em energia mecânica através da utilização de uma turbina a vapor. A turbina a vapor possui um conjunto de hélices com múltiplas pás, conforme figura 13. Quando o vapor atravessa as pás movimenta as hélices gerando um movimento de rotação no eixo acoplado as hélices. Esse movimento de rotação pode ser transferido a um gerador acoplado que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Existem dois tipos principais de turbinas as de contrapressão e as de condensação. As turbinas de contrapressão têm a exaustão dos gases em pressão superior a atmosférica. Essas turbinas são utilizadas quando existe a necessidade da utilização de vapor em alta pressão em algum outro sistema sendo muito utilizado por indústrias. Nas turbinas de condensação a exaustão dos gases é em pressão inferior a atmosférica operando em ciclo fechado onde o vapor é resfriado e bombeado para a caldeira para continuação do ciclo.

Figura 13 - Vista interna de uma turbina a vapor



Fonte: TGM WEG, 2020

2.4.3 Motogerador

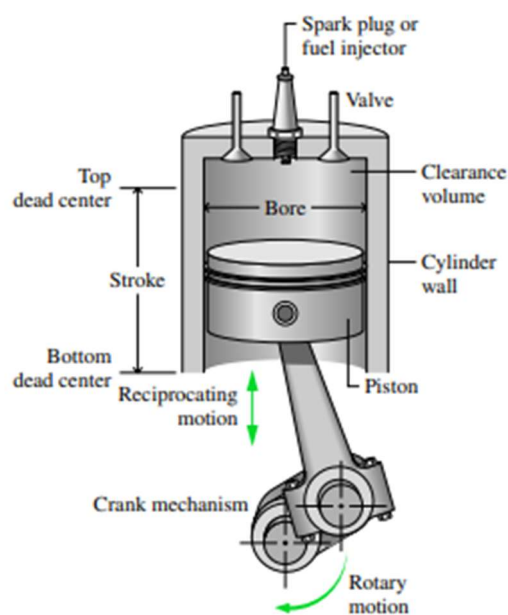
Os motogeradores são motores de combustão interna aonde a expansão dos gases provenientes da queima de um combustível gera um movimento de rotação em um eixo.

Os motores podem operar no ciclo Otto no qual motores para veículos a gasolina e etanol operam, ou no ciclo Diesel para veículos com motores movidos a óleo Diesel. A principal diferença entre os dois ciclos se encontra na forma em que é gerado a ignição da mistura ar combustível.

Os componentes de ambos motores são similares possuindo pistão que opera dentro de um cilindro e que é ligado a um eixo virabrequim por uma biela conforme figura 14. O funcionamento ocorre em quatro etapas chamadas de tempos. Na primeira fase ocorre a descida do pistão e a admissão do ar, somente do ar para o ciclo Diesel e do ar e do combustível no ciclo Otto. No segundo tempo o pistão sobe comprimindo o ar admitido. No período de transição do segundo para o terceiro tempo é que está a principal diferença entre os ciclos. No ciclo Otto existe uma vela de ignição que gera uma centelha para que a mistura de ar combustível entre em ignição

e gere a queima. No ciclo Diesel não existe essa vela de ignição e o combustível é pulverizado diretamente sobre o ar comprimido e isto gera a ignição dentro da câmara de combustão. Com a ignição ocorre o terceiro tempo onde a ocorre a expansão e descida do pistão e no quarto tempo o pistão sobe novamente para exaustão dos gases gerados pela queima da mistura.

Figura 14 - Conjunto pistão, biela, virabrequim



Fonte: (SHAPIRO; MORAN, 2006)

Essa alternância gera movimento de rotação no eixo virabrequim que é transferido para um gerador acoplado ao motor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

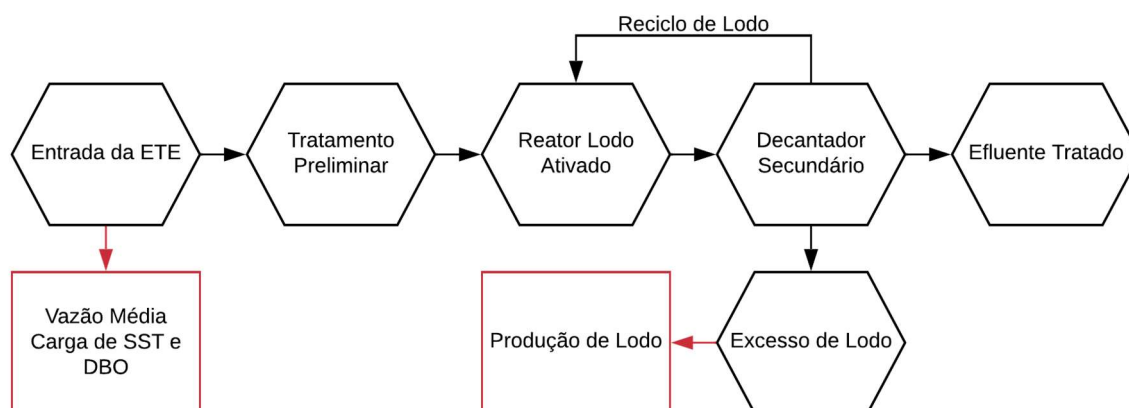
O desenvolvimento de qualquer projeto em uma estação de tratamento de esgoto depende do volume e tipo de esgoto a ser tratado. O sistema desenvolvido foi realizado em um modelo teórico do tipo lodo ativado que tomou como base a ETE Insular no município de Florianópolis que passará por ampliação e prevê o atendimento de 285 mil pessoas até 2035 e recebe efluentes do tipo doméstico de residências e comércios.

3.1 PARÂMETROS DE PROJETO

Para a avaliação dos potenciais de geração de energia, seja através da produção de biogás ou pela queima do lodo de esgoto foram inicialmente necessários os cálculos dos parâmetros de vazão média e das cargas de Sólidos Suspensos Totais (SST) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) presentes no efluente de entrada. Assim como a produção do excesso de lodo removido no decantador secundário.

O fluxograma da Figura 15 serve para ilustrar a origem dos parâmetros dentro da estação de tratamentos de efluentes.

Figura 15 – Fluxograma de uma ETE e origem dos parâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

3.1.1 Vazão média

A Estimativa de vazão média pode ser calculada através da equação (4), considerando que a média de consumo de água por habitante informada pela companhia de distribuição de água local é de 154 litros por habitante por dia (Casan, 2020). O Coeficiente de retorno de 0,8 será adotado como recomendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9649 de 1986 na ausência de dados locais comprovados.

$$Q = \frac{P[hab].q[l/hab.dia].C}{86400 [s/dia]} \quad (4)$$

$$Q = \frac{285000.154.0,8}{86400} = 406,39 \text{ l/s} = 35.112,00 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Sendo que:

Q = Vazão de projeto [l/s]

P = População final de projeto [hab]

q = Consumo per capita [l/hab.dia]

C = Coeficiente de retorno

3.1.2 Cargas de SST e DBO

Os valores de sólidos suspensos totais (SST), equação (5), e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), equação (6), foram calculados com base na ABNT NBR 12209 de 2011 que recomenda, na ausência de informações de campo, a utilização de valores de SST per capita entre 45 a 70gSS/hab.dia e de DBO per capita entre 45 a 60gDBO/hab.dia.

Será adotado o valor de 45g/hab.dia para SST_{pc} e de 50g/hab.dia para DBO_{pc} , pois possuem valores mais próximos a dados de campo de DBO e SST encontrados na região em avaliação realizada pela Agencia Reguladora de Serviços de Saneamento Básico do Estado de Santa Catarina (AGESAN)(2015)(2017).

$$SST = \frac{P[hab]. SST_{pc}[g/hab. dia]}{Q[m^3/dia]} \quad (5)$$

$$SST = \frac{285000.45}{35112} = 365,26 \text{ g/m}^3$$

Sendo,

SST = Sólidos suspenso totais [g/m^3]

P = População atendida [hab]

SST_{pc} = Sólidos suspensos totais per capita. [g/hab.dia]

Q = Vazão média [m^3/dia]

$$DBO = \frac{P[hab]. DBO_{pc}[g/hab. dia]}{Q[m^3/dia]} \quad (6)$$

$$DBO = \frac{285000.50}{35112} = 405,84 \text{ g/m}^3$$

Sendo,

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio [g/m^3]

P = População atendida [hab]

DBO_{pc} = DBO per capita. [g/hab.dia]

Q = Vazão média [m^3/dia]

3.1.3 Produção de excesso de lodo

A estimativa da massa de excesso lodo produzido no sistema de lodo ativado foi obtida pela equação (7) de balanço de massa.

$$P = \frac{Q[m^3/dia]. (k. SST[g/dia])}{1000[g/kg]} \quad (7)$$

$$P = \frac{35112. (0,9.365,26)}{1000} = 11542,5 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

P = Produção de lodo em base seca [kg/dia]

Q = Vazão afluyente [m³/dia]

k = Eficiência de remoção de SST [%]

SST = Concentração de sólidos suspensos totais no afluyente [g/m³]

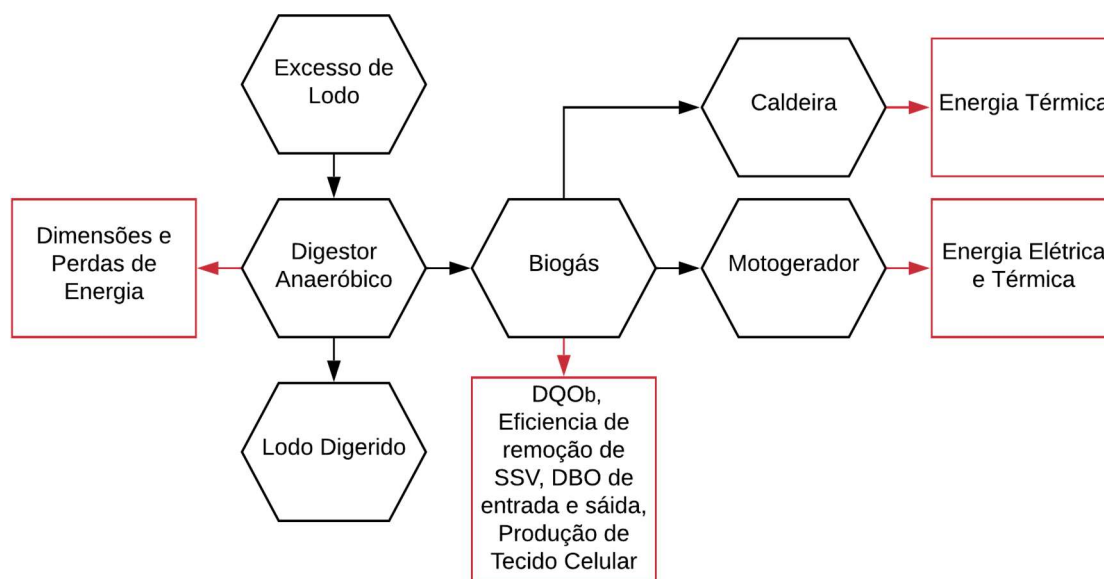
3.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Para a avaliação do potencial da geração de energia através do biogás produzido a partir da digestão anaeróbica do lodo de esgoto foram necessárias a determinação das dimensões do digestor. Para a quantificação do biogás produzido foram necessários os cálculos da Demanda Química de Oxigênio da parte biodegradável do lodo (DQO_b), a eficiência de remoção dessa matéria biodegradável representada pela eficiência de remoção de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), das cargas de DBO de entrada e saída do digestor e a produção de tecido celular.

Com a quantificação do biogás produzido foi realizado a quantificação das perdas de energia no digestor anaeróbico e calculado a capacidade de produção de energia térmica em forma de vapor produzida em uma caldeira e da produção conjunta de energia elétrica e térmica a partir de um motogerador

Os processos e origem dos parâmetros são ilustrados no fluxograma da figura 16.

Figura 16 – Fluxograma dos processos e origem dos parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.2.1 Dimensionamento do digestor

O volume do digestor anaeróbico pode ser obtido pela equação (8), considerando-se que se trata de um digestor de alta taxa com mistura completa operando a uma temperatura de 35 °C. O Tempo de retenção de sólidos em digestores de alta taxa varia entre 10 a 20 dias, sendo o valor de 18 dias o recomendado pela ABNT NBR 12209 de 2011.

A ABNT NBR 12209 de 2011 também recomenda que para estações de tratamento de efluentes com vazão superior a 250 l/s se utilize mais de um digestor. Considerando que a ETE do projeto possui vazão média de 406,39 l/s se utilizará dois digestores anaeróbicos.

$$Vd = \frac{Vl[m^3/dia].TRS[dia]}{n} \quad (8)$$

$$Vd = \frac{282,9.18}{2} = 2546,14 \, m^3$$

Sendo,

Vd = Volume do digestor [m^3]

VI = Volume de lodo gerado [m^3/dia]

TRS = Tempo de retenção de sólidos [dia]

n = número de digestores

A altura do digestor anaeróbico cilíndrico, segundo Tchobanoglous et al(2016), não deve ser inferior a 7,5 metros devido à dificuldade de mistura em digestores rasos podendo atingir até 15 metros de altura. Os digestores cilíndricos podem ter entre 6 a 38 metros de diâmetro e deve possuir fundo cônico, segundo a ABNT NBR 12209 de 2011 com declividade de pelo menos 1:6 (vertical:horizontal). Os valores adotados serão de 20 metros de diâmetro, 8 metros de altura e 10 metros de altura no centro do digestor.

A taxa de aplicação de carga no digestor pode ser calculada pela equação (9)

$$CVd = \frac{DQOb[kg/dia]}{Vd[m^3].n} \quad (9)$$

$$CVd = \frac{12825}{2546,14.2} = 2,52 \text{ kg}/m^3.dia$$

Sendo,

CVd = taxa de aplicação de carga no digestor [$kg/m^3.dia$]

$DQOb$ = Demanda química de oxigênio biodegradável [kg/dia]

n = número de digestores

A taxa de aplicação de 2,52kg/m³.dia encontra-se dentro dos valores admissíveis de acordo com a ABNT NBR 12209 de 2011 de 1,2 kg/m³.dia a 4,8 kg/m³.dia para digestores de alta taxa.

3.2.2 DQO_b

Com os valores de vazão média, DBO e SST disponíveis foi possível determinar a carga orgânica que estará presente no lodo que será enviado ao digestor anaeróbico, onde ocorrerá a produção de biogás e a redução da massa de sólidos suspensos voláteis presentes.

Os sistemas de tratamento de esgoto do tipo lodo ativado, de acordo com Von Sperling (2002 apud PÉRICO, 2009), tem a capacidade de remover de 85 a 95% de SST e 90 a 95% de DBO do efluente. A SST e DBO removidas são incorporadas ao lodo que será enviado ao digestor. A carga orgânica presente pode ser calculada através da equação (10) onde será determinado a DQO biodegradável presente no lodo.

$$DQO_b = \frac{e \cdot DBO[g/m^3] \cdot Q[m^3/dia]}{1000[g/kg]} \quad (10)$$

$$DQO_b = \frac{0,9 \cdot 365,26 \cdot 35112}{1000} = 12825 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

DQO_b = Demanda química de oxigênio biodegradável [kg/dia]

e = Eficiência de remoção de DBO [%]

DBO = Concentração de DBO no afluente [g/m^3]

Q = Vazão afluente [m^3/dia]

3.2.3 Eficiência de remoção de SSV

A eficiência de remoção de sólidos suspensos voláteis no digestor pode ser calculada pela equação empírica (11) (Liptak, 1974 apud TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). O tempo de retenção de sólidos utilizado será de 18 dias como recomenda a ABNT NBR 12209 de 2011.

$$e_{RSSV} = 13,7 \cdot \ln(TRS) + 18,9 \quad (11)$$

$$e_{RSSV} = 13,7.Ln(18) + 18,9 = 58\%$$

3.2.4 Carga de DBO na entrada e saída do digestor

A determinação das cargas de DBO na entrada e saída dos digestores são necessárias para os cálculos de produção de tecido celular e consequente quantificação da produção de biogás no digestor anaeróbico. A equação (12) determina o valor de DBO de entrada e a equação (13) determina a carga de DBO na saída do digestor

$$S_o = e.DBO[g/m^3] \quad (12)$$

$$S_o = 0,9.365,26 = 365,26 g/m^3$$

Sendo,

S_o = Carga de DBO que entra no digestor $[g/m^3]$

e = eficiência de remoção de DBO no reator de lodo ativado.

DBO = Carga de demanda bioquímica de oxigênio no efluente de entrada.

$$S = S_o[g/m^3](1 - e_{RSSV}) \quad (13)$$

$$S = 328,73(1 - 0,58) = 151,59 g/m^3$$

Sendo,

S = Carga de DBO que sai do digestor $[g/m^3]$

e_{RSSV} = Eficiência de Remoção de SSV no digestor [%]

3.2.5 Produção de tecido celular

Para a quantificação de biogás gerado é necessário primeiro o cálculo da massa líquida de tecido celular, equação (14), produzido diariamente dentro do digestor anaeróbico. Os valores típicos da síntese celular Y e do coeficiente de decaimento b são apresentados na tabela 02 e foram utilizados neste projeto os seus valores típicos.

Tabela 02 – Valores de síntese e decaimento celular.

Parâmetro	Faixa	Típico	Unidade
Y Síntese celular fermentação	0,06-0,12	0,10	g _{SSV} /g _{DQO}
Y Síntese celular metanogênese	0,02-0,06	0,04	g _{SSV} /g _{DQO}
Y Síntese celular global	0,05-0,10	0,08	g _{SSV} /g _{DQO}
b Coeficiente de decaimento fermentação	0,02-0,06	0,04	g/g.dia
b Coeficiente de decaimento metanogênese	0,01-0,04	0,02	g/g.dia
b Coeficiente de decaimento global	0,02-0,04	0,03	g/g.dia

Fonte: (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016)

$$Px = \frac{Y[g_{SSV}/g_{DQO}] \cdot Q[m^3/dia] (So[g/m^3] - S[g/m^3])}{1000[g/kg] \cdot (1 + (b[g/g.dia] \cdot TRS[dias]))} \quad (14)$$

$$Px = \frac{0,08.35112(365,26 - 151,59)}{1000 \cdot (1 + (0,03.18))} = 389,73 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

Px = Sólidos voláteis produzidos [kg/dia]

Y = Síntese celular global [g_{SSV}/g_{DQO}]

Q = Vazão afluenta da ETE [m³/dia]

So = Carga de DBO que entra no digestor [g/m³]

S = Carga de DBO que sai do digestor [g/m³]

b = Coeficiente de decaimento [g/g.dia]

TRS = Tempo de retenção de sólidos [dia]

3.2.6 Produção de biogás

Para o cálculo de produção de biogás foi calculado primeiro o volume de gás metano produzido. O volume de gás metano produzido no sistema pode ser calculado pela equação (15) considerando-se o fator de conversão de 0,4 m³CH₄ para cada kgDQO removida a uma temperatura de 35°C e pressão de 1 atm.

$$VCH_4 = 0,4[m^3/kg]. \left(\frac{(S_o - S)[g/m^3]. Q[m^3/dia]}{1000[g/kg]} - (1,42.Px[kg/dia]) \right) \quad (15)$$

$$VCH_4 = 0,4. \left(\frac{(365,26 - 151,59). 35112}{1000} - (1,42.389,73) \right) = 2779,58 m^3/dia$$

Portanto considerando que em sua composição típica o biogás possui 60% de metano, o volume de biogás produzido pode ser estimado pela equação (16).

$$Vbg = \frac{VCH_4}{0,6} \quad (16)$$

$$Vbg = \frac{2779,58}{0,6} = 4632,64 m^3/dia$$

3.2.7 Potência para aquecimento do reator

A potência requerida para manutenção da temperatura do digestor anaeróbico a 35°C pode ser calculada através da soma da potência necessária para o aquecimento do lodo bruto que entra no digestor e as perdas de calor através de sua estrutura, como paredes, piso e cobertura.

Para o cálculo das perdas de calor no digestor anaeróbico é necessário saber suas dimensões. As áreas em que ocorre a perda de calor podem ser obtidas a partir das equações (17), (18) e (19).

a) Área Parede

$$A_{parede} = \pi. d. h \quad (17)$$

$$A_{parede} = \pi. 20.8 = 502,65 m^2$$

Sendo,

d = diâmetro do digestor [m]

h = altura da parede do digestor [m]

b) Área do Piso

$$A_{Piso} = \pi \cdot r \cdot (r^2 + (h_c - h)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$A_{Piso} = \pi \cdot 10 \cdot (10^2 + (10 - 8)^2)^{\frac{1}{2}} = 320,38 \text{ m}^2$$

Sendo,

r = raio do digestor [m]

h_c = altura no centro do digestor [m]

h = altura da parede do digestor [m]

c) Área da Cobertura

$$A_{Cobertura} = \pi \cdot r^2 \quad (19)$$

$$A_{Cobertura} = \pi \cdot 10^2 = 314,16 \text{ m}^2$$

Sendo,

r = raio da cobertura do digestor [m]

Para o cálculo das perdas é necessário saber a temperatura em que estas estruturas estão em contato, seja do ar, do solo ou do lodo bruto. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), a temperatura média anual em Florianópolis é de 19,2 °C tendo menor média climatológica no mês de julho com 15,2°C. Considerando que o maior uso de energia se dará nestas condições a temperatura de 15,2 °C será a adotada. O mesmo valor será adotado para a temperatura do lodo bruto e para a temperatura do solo.

Devido a esta variação de temperatura ocorre variação na quantidade de gás consumida para aquecimento do reator, assim como também pode haver variação na produção de biogás. Por isso é necessária a existência de tanques de armazenamento para o biogás, que podem ser de baixa ou alta pressão de acordo com a necessidade. Segundo a Agencia para Recursos Renováveis da Alemanha(FNR, 2010) deve haver a capacidade de armazenamento de pelo menos 25% da produção diária sendo recomendado a capacidade de 1 a 2 dias de produção de biogás.

Pode-se então calcular as perdas de calor com a equação (20). Os valores dos coeficientes de transferência de calor podem ser utilizados a partir da tabela 01.

$$q = U[W/m^2.^\circ C]A[m^2]\Delta T[^\circ C] \quad (20)$$

Sendo,

q = quantidade de energia [W]

U = coeficiente de transferência de calor [$W/m^2.^\circ C$]

A = Área onde ocorre a transferência de calor [m^2]

ΔT = Diferença de temperatura entre ambos os lados da superfície.

$$q_{parede} = 0,8.502,65. (35 - 15,2) = 7965,05 \text{ W} = 7,97 \text{ kW}_{te}$$

$$q_{piso} = 2,85.320,38. (35 - 15,2) = 18079,09 \text{ W} = 18,08 \text{ kW}_{te}$$

$$q_{cobertura} = 1.314,16. (35 - 15,2) = 6220,35 \text{ W} = 6,22 \text{ kW}_{te}$$

$$q_{Digestor} = 7965,05 + 18079,09 + 6220,35 = 32261,5 \text{ W} = 32,26 \text{ kW}_{te}$$

A quantidade de energia requerida para aquecer o lodo bruto pode ser calculada pela equação (22), admitindo-se que o calor específico do lodo é o mesmo da água de $4,2 \text{ kJ/kg.}^\circ C$ e que a massa de lodo que entra no reator tem 4% de teor de sólidos, definida pela equação (21).

$$mLB = \frac{P[kg/dia]}{Cs} \quad (21)$$

$$mLB = \frac{11542,5}{0,04} = 288562,5 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

mLB = massa de lodo bruto [kg/dia]

P = Produção de lodo em base seca [kg/dia]

Cs = Concentração de sólidos [%]

$$q_{lodo} = \frac{mLB[kg/dia]. c[kJ/kg.^\circ C]. \Delta T[^\circ C]}{86400[s/dia]} \quad (22)$$

$$q_{lodo} = \frac{288562,5.4,2.(35 - 15,2)}{86400} = 277,74 \text{ kW}_{te}$$

Sendo,

q_{lodo} = Potência para aquecer o lodo [kW]

mLB = massa de lodo bruto [kg/dia]

c = calor específico [kJ/kg.°C]

ΔT = Diferença de temperatura [°C]

A potência necessária para manter o reator aquecido pode ser calculada pela equação (30)

$$q_{total} = q_{lodo} [kW] + n. q_{digestor} [kW] \quad (23)$$

$$q_{total} = 277,74 + 2.32,26 = 342,26 \text{ kW}_{te}$$

Sendo,

q_{lodo} = Potência para aquecer o lodo [kW]

n = número de digestores

$q_{digestor}$ = Perda de calor pela estrutura do digestor [kW]

3.2.8 Potência térmica do biogás

Para aproveitamento energético do biogás é necessária à sua combustão, que pode ser realizada por caldeiras, motogeradores ou turbinas para geração de energia elétrica e ou térmica.

A potência disponível no biogás resultante da digestão anaeróbica pode ser calculada pela equação (24). Considera-se aqui a utilização do biogás para alimentação de uma caldeira para geração de energia térmica através de vapor e que estas possuem eficiência em torno de 85%, podendo atingir valores superiores com o reaproveitamento da energia dos gases da queima.

$$P = \frac{Q_{biogás}[m^3/dia]. PCI[kJ/m^3]. n}{86400[s/dia]} \quad (24)$$

$$P = \frac{4632,64.21500.0,85}{86400} = 979,88 kW_{te}$$

P = Potência disponível [kW]

$Q_{biogás}$ = Vazão de biogás [m^3/dia]

PCI = Potencial calorífico inferior do biogás [kJ/m^3]

n = eficiência do sistema [%]

3.2.9 Potência elétrica do Biogás

A geração de energia elétrica a partir do biogás pode ser realizado em turbinas a gás que obedecem ao ciclo Brayton ou através de motores a combustão do ciclo Otto ou Diesel.

Para geração de energia os motores do ciclo Otto e Diesel possuem em geral maior eficiência em comparação a turbinas a gás para potencias inferiores a 5 MW. Para potencias mais elevadas as turbinas a gás principalmente com o uso de caldeiras de recuperação de energia é possível atingir eficiências acima do 60%(SIEMENS, 2020).

Para calculo da potencia elétrica disponivel podemos multiplicar a potencia disponivel de biogás pelas eficiencias elétrica e térmicas do motor, equação (25). As eficiencias do motor são demonstradas no quadro 01.

$$P = \frac{Q_{biogás}[m^3/dia]. PCI[kJ/m^3]. n}{86400[s/dia]} \quad (25)$$

$$P_{el} = \frac{4632,64.21500.0,417}{86400} = 480,72 kW_{el}$$

$$P_{te} = \frac{4632,64.21500.0,433}{86400} = 499,16 kW_{te}$$

Quadro 01 – Motores Ciclo Otto para uso com biogás

Biogas, Landfill Gas, Sewage Gas								
Model	rpm	Electric Power ³⁾				Efficiency ⁴⁾		
		@ 1.0 pf	@ 0.8 pf	Mechanical Power		Electrical Efficiency	Thermal Efficiency	Total Efficiency
		kW _e		kW _m	bhp	%	%	%
G3406	1800	137	137	145	194	27.7%	61.1%	88.8%
G3412	1800	194	191	205	275	26.5%	62.9%	89.4%
CG132B-8	1800	400	397	415	556	41.7%	43.3%	85.0%
CG132B-12	1800	600	596	621	832	41.7%	43.6%	85.3%
CG132B-16	1800	800	794	827	1109	41.9%	43.3%	85.2%
G3516A	1200	824	816	856	1148	31.0%	47.7%	78.7%
G3516A	1200	1012	1000	1053	1412	38.4%	37.8%	76.2%
CG170-12	1500	1200	1188	1235	1656	42.8%	42.8%	85.6%
CG170-16	1500	1560	1544	1619	2170	42.3%	43.1%	85.4%
G3520C	1200	1622	1600	1672	2242	39.8%	40.9%	80.8%
G3520C	1500	1936	1946	2015	2702	39.1%	41.4%	80.5%
CG170-20	1500	2000	1980	2055	2756	42.7%	43.2%	85.9%
CG260-16	900	3510	3503	3614	4846	43.3%	38.5%	81.8%

Fonte: Catterpillar, 2020

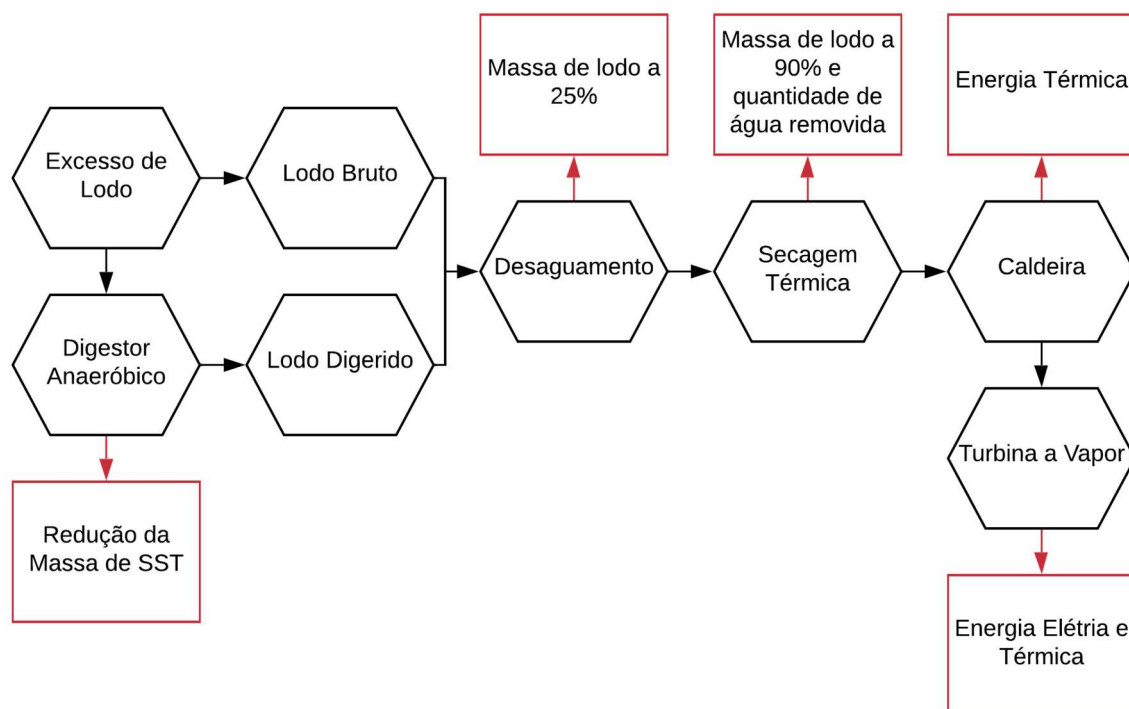
3.3 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO

O excesso de lodo de esgoto após adensado pode ser diretamente encaminhado para desaguamento, ao qual neste trabalho será denominado lodo bruto, ou encaminhado para o digestor anaeróbico que resulta na produção de dois subprodutos principais o biogás como já dimensionado e o lodo digerido.

Em ambos os casos para que seja possível a queima do lodo em caldeira é necessário que o lodo possua a menor quantidade de água possível. Para isso ambos passam primeiro pelo processo de desaguamento, neste caso considerando-se uma centrífuga que pode produzir lodos com 25% de sólidos, para que possam ser encaminhados ao secador térmico para obtenção de lodos com teor de sólidos na casa dos 90%.

Foram definidos a produção de lodo digerido considerando a redução de massa que ocorre dentro do digestor anaeróbico devido a conversão de SSV em biogás. Calculados então as massas de lodo a 25% e 90% de teor de sólidos, obtendo-se a quantidade de água a ser removida e a energia necessária para sua secagem. Com isso é possível verificar os potenciais de geração de energia térmica e energia elétrica do lodo. O fluxograma dos processos e origem dos parâmetros estão na figura

Figura 17 - Fluxograma de processo e origem dos parâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

3.3.1 Secagem térmica do lodo digerido

Para determinar a quantidade de energia é necessário saber a quantidade de água a ser evaporada. Para isso se utilizará a quantidade de lodo em base seca que sai do digestor anaeróbico, e obter sua massa considerando que após desidratação em centrífuga o lodo terá 25% de teor de sólidos e que após o processo de secagem irá possuir concentração de sólidos de 90%.

Considerando que o digestor anaeróbico tem a capacidade de realizar a destruição dos sólidos voláteis presentes no lodo, faz com que haja a redução de sua massa.

Estima-se que 70% dos sólidos suspensos na massa de lodo que adentra ao reator anaeróbico seja de sólidos voláteis, estes que tem a capacidade de serem biodegradados. Portanto torna-se possível estimar a massa de sólidos voláteis, equação (26) e a de sólidos fixos, equação (27) presentes na massa de lodo:

$$mSSV = 0,7 \cdot P [kg/dia] \quad (26)$$

$$mSSV = 0,7 \cdot 11542,5 = 8079,75 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

$mSSV$ = massa de sólidos suspensos voláteis [kg/dia]

P = Produção de lodo em base seca [kg/dia]

$$mSSF = P [kg/dia] - mSSV [kg/dia] \quad (27)$$

$$mSSF = 11542,5 - 8079,75 = 3462,75 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

$mSSF$ = massa de sólidos suspensos fixos [kg/dia]

P = Produção de lodo em base seca [kg/dia]

$mSSV$ = massa de sólidos suspensos voláteis [kg/dia]

Considerando a taxa de 58% de remoção de SSV no digestor encontrada na equação (11) calcula-se a massa de SSV na saída do digestor através da equação (28).

$$mSSV_{saída} = mSSV [kg/dia] \cdot (1 - eRSSV) \quad (28)$$

$$mSSV_{saída} = 8079,75 \cdot (1 - 0,58) = 3353,25 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

$mSSV_{saída}$ = Massa de sólidos suspensos voláteis na saída do digestor [kg/dia]

$mSSV$ = massa de sólidos suspensos voláteis [kg/dia]

$eRSSV$ = Eficiência na destruição de sólidos voláteis no digestor. [%]

A massa final de sólidos totais pode ser calculada somando-se a massa de sólidos fixos com a massa de sólidos voláteis na saída do digestor pela equação (29).

$$mSST_{saída} = mSSF [kg/dia] + mSSV_{saída} [kg/dia] \quad (29)$$

$$mSST_{Saída} = 3462,75 + 3353,25 = 6816,00 \text{ kg/dia}$$

Sendo,

$mSST_{Saída}$ = massa de sólidos suspensos totais na saída do digestor [kg/dia]

$mSSF$ = massa de sólidos suspensos fixos [kg/dia]

$mSSV_{Saída}$ = massa de sólidos suspensos voláteis na saída do digestor [kg/dia]

A massa de lodo para cada concentração de sólido pode ser obtida pela equação (30)

$$mL = \frac{mSST[kg/dia]}{Cs} \quad (30)$$

$$mL = \frac{6816}{0,25} = 27264 \text{ kg/dia á 25\% de sólidos}$$

$$mL = \frac{6816}{0,90} = 7573,33 \text{ kg/dia á 90\% de sólidos}$$

Subtraindo-se ambos pode-se encontrar a massa de água a ser evaporada, equação (31).

$$m_{\text{água}} = mL_{25\%}[kg/dia] - mL_{90\%}[kg/dia] \quad (31)$$

$$m_{\text{água}} = 27264 - 7573,33 = 19690,67 \text{ kg/dia}$$

Segundo David (2002) a energia necessária para evaporação da água do lodo nos secadores térmicos é em torno de 3360 a 4200 kJ por kg de água evaporada. A estimativa da quantidade de energia necessária para evaporação da água do lodo pode ser obtida a partir da equação (32), sendo adotado o valor de energia de 3780 kJ/kg de água evaporada.

$$q = \frac{q_{\text{evaporação}}[kJ/kg] \cdot m_{\text{água}}[kg/dia]}{86400[s/dia]} \quad (32)$$

$$q = \frac{3780.19690,67}{86400} = 861,47 \text{ kW}_{te}$$

3.3.2 Secagem térmica do lodo bruto

A determinação da quantidade de energia necessária para secagem térmica do excesso de lodo ativado utiliza-se dos mesmos princípios anteriores. Para isso se utilizará a quantidade de lodo em base seca que é removido do decantador secundário diariamente obtido pela equação (7) e obter sua massa considerando que após desaguamento em centrífuga o lodo terá 25% de teor de sólidos e que após o processo de secagem térmica irá possuir concentração de sólidos de 90% estes valores serão obtidos com a equação (30).

$$mL = \frac{mSST[kg/dia]}{Cs} \quad (30)$$

$$mL = \frac{11542,5}{0,25} = 46170 \text{ kg/dia á 25\% de sólidos}$$

$$mL = \frac{11542,5}{0,90} = 12825 \text{ kg/dia á 90\% de sólidos}$$

Subtraindo-se ambos se encontra a massa de água a ser evaporada, equação (31).

$$m_{\text{água}} = mL_{25\%}[kg/dia] - mL_{90\%}[kg/dia] \quad (31)$$

$$m_{\text{água}} = 46170 - 12825 = 33345 \text{ kg/dia}$$

Novamente a estimativa da quantidade de energia necessária para evaporação da água do lodo pode ser obtida a partir da equação (32), sendo adotado o valor de energia de 3780 kJ/kg de água evaporada.

$$q = \frac{q_{\text{evaporação}}[kJ/kg] \cdot m_{\text{água}}[kg/dia]}{86400[s/dia]} \quad (32)$$

$$q = \frac{3780.33345}{86400} = 1458,84 \text{ kW}_{te}$$

3.3.3 Potência térmica do lodo

O lodo seco obtido através da secagem térmica pode ser utilizado como combustível para a caldeira.

O lodo digerido seco que vem do digestor anaeróbico possui PCI de 12 MJ/kgSST, considerando a produção de 6.816,00 kg/dia de sólidos totais obtidos podemos definir a potência térmica disponível do lodo seco através da equação (33)

$$P = \frac{m_{lodo}[kg/dia].PCI[kJ/kg].n}{86400[s/dia]} \quad (33)$$

$$P = \frac{6816.12000.0,85}{86400} = 804,67 \text{ kW}_{te}$$

P = Potência disponível [kW]

m_{lodo} = massa de lodo em base seca [kg/dia]

PCI = Potencial calorífico inferior do lodo [kJ/kg]

n = eficiência do sistema [%]

A energia produzido pelo lodo bruto também pode ser calculada através da equação (33), porém o PCI do excesso de lodo ativado é de 21 MJ/kgSST e a massa de lodo em base seca é de 11.542 kg/dia.

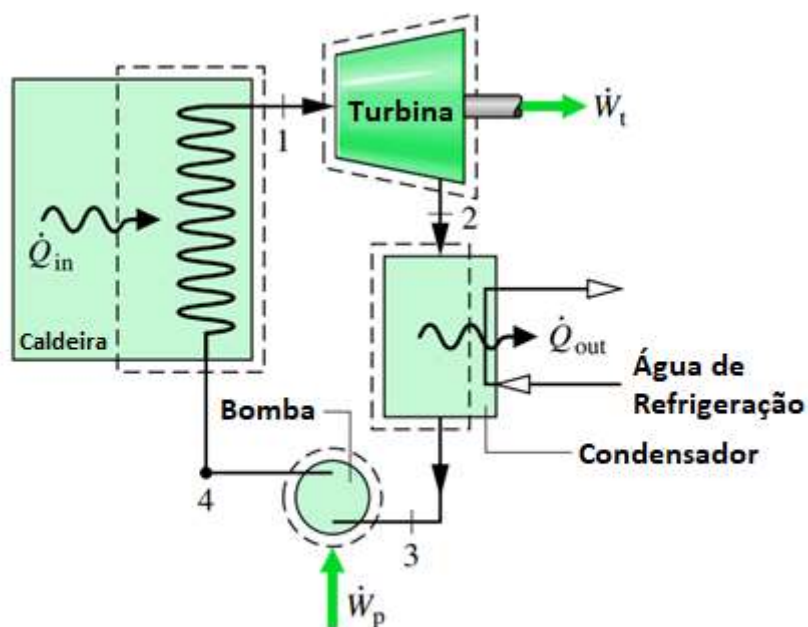
$$P = \frac{11542,5.21000.0,85}{86400} = 2384,65 \text{ kW}_{te}$$

3.3.4 Potência elétrica do lodo bruto

A partir da produção de vapor gerada pela queima do lodo bruto seco em caldeira é possível realizar a produção de energia elétrica com a utilização de uma turbina a vapor.

Usinas termoeletricas com geração de energia a partir de turbinas a vapor podem ser projetadas a partir do ciclo termodinâmico de Rankine. O ciclo é composto por quatro componentes principais: (i) A caldeira, que eleva a temperatura da água até a completa evaporação; esse vapor é então conduzido a (ii) turbina onde o calor transportado pelo vapor é transformado em trabalho. A água em estado misto entre líquido e gás que sai pela turbina passa por um (iii) condensador para que ocorra a completa transformação do estado físico da água para líquido a partir da liberação de calor. O fluido líquido vindo do condensador passa por uma (iv) bomba onde sua pressão é elevada e transportado para a caldeira para recomeço do ciclo. O ciclo pode ser visualizado na figura 18.

Figura 18 - Ciclo Rankine



Fonte: (SHAPIRO; MORAN, 2006)

Sendo:

Q_{in} = Calor de entrada na caldeira

Q_{out} = Calor removido no condensador

W_t = Trabalho realizado pela turbina

W_p = Trabalho realizado pela bomba

Para calcular a potência elétrica e térmica disponível no sistema será admitido que não há perdas nas tubulações de transporte do fluido e nem perdas para o ambiente, ou seja, o ciclo ideal de Rankine. Com isso segundo Shapiro e Moran (2006) o fluido de trabalho opera sobre os seguintes processos internos.

- A expansão do fluido de trabalho na turbina ocorre de forma isentrópica.
- O fluido de trabalho passa pelo condensador a uma pressão constante
- A compressão do fluido na bomba ocorre de forma isentrópica
- Na caldeira o calor é transferido para o fluido de trabalho a uma pressão constante.

Com isso pode-se iniciar os cálculos das entropias, entalpias e de calor e trabalho gerados pelas unidades com base nos pontos 1,2,3 e 4 da figura 18.

Com base em especificações técnicas de turbinas a vapor será considerado que o fluido de trabalho entra na turbina em forma de vapor sobreaquecido a uma temperatura de 300° C e a uma pressão de 4,5MPa e sai a uma pressão de 0,01MPa podemos obter a entalpia e a entropia nos pontos conforme dados da tabela 03.

Tabela 03 – Vapor Sobreaquecido

p=4,50 Mpa				
Temperatura °C	Volume esp. m³/kg	Energia Int. kJ/kg	Entalpia kJ/kg	Entropia kJ/kgK
Saturação	0,004406	2600,0	2798,3	60,198
300	0,05135	2712,0	2943,1	6,2827

Fonte: (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003)

A entalpia (h) e entropia (s) do ponto 1 são:

$$h_1 = 2943,1 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 6,2828 \text{ kJ/kgK}$$

No ponto 2 a pressão que sai da turbina é de 0,01 MPa e como o fluido sai da turbina com mesma entropia do ponto 1 pode-se calcular o título, equação (34), do fluido utilizando-se dos valores de entropia de líquido saturado e vapor saturado a partir dos dados da tabela 04.

Tabela 04 – Água Saturada (Líquido e Vapor)

p=0,01 Mpa										
Volume esp. m³/kg		Energia Int. kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kgK		
Líquido Sat. v _f	Vapor Sat. v _g	Líquido Sat. u _f	Evap. u _{fg}	Vapor Sat. u _g	Líquido Sat. h _f	Evap. h _{fg}	Vapor Sat. h _g	Líquido Sat. s _f	Evap. s _{fg}	Vapor Sat. s _g
0,00101	15,26	188,44	2248,4	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	7,5261	8,1648

Fonte: (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003)

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_g - s_f} \quad (34)$$

$$x_2 = \frac{6,2828 - 0,6387}{8,1648 - 0,6387} = 0,75$$

Podemos agora calcular a entalpia no ponto 2 através da equação (35)

$$h_2 = h_f + x_2 h_{fg} \quad (35)$$

$$h_2 = 188,45 + 0,75 \cdot 2394,8 = 1984,399 \text{ kJ/kg}$$

No ponto 3 o fluido de trabalho sai do condensador em estado líquido saturado a uma pressão constante de 0,01 MPa portanto utilizando-se da tabela 04 pode-se encontrar a entalpia no ponto 3.

$$h_3 = 188,45 \text{ kJ/kg}$$

No ponto 4 a entalpia pode ser determinada com a utilização da equação (36) e dados da tabela 04 para o volume específico.

$$\begin{aligned}v_3 &= 0,00101 \text{ m}^3/\text{kg} \\h_4 &= h_3 + v_3(p_4 - p_3) \\h_4 &= 188,45 + 0,00101(4500 - 10) = 192,98 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\tag{36}$$

Com isso determina-se a vazão mássica a partir da equação (37) e da potência obtida na equação (33) para o lodo bruto.

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{Q_{in}}{h_1 - h_4} \\ \dot{m} &= \frac{2384,65}{2943,1 - 192,98} = 0,87 \text{ kg/s}\end{aligned}\tag{37}$$

A partir disto foi possível o cálculo do trabalho gerado pela turbina, equação (38), do calor a ser dissipado pelo condensador, equação (40), e do trabalho da bomba, equação (41).

$$\begin{aligned}W_t &= \dot{m}(h_1 - h_2) \\ W_t &= 0,87(2943,1 - 1984,4) = 831,30 \text{ kW}_m\end{aligned}\tag{38}$$

Considerando uma eficiência de 80% no gerador pode-se obter a potência elétrica da turbina pela equação (39).

$$\begin{aligned}P_g &= W_t \cdot \eta \\ P_g &= 831,3 \cdot 0,8 = 665,04 \text{ kW}_{el}\end{aligned}\tag{39}$$

$$\begin{aligned}Q_{out} &= \dot{m}(h_2 - h_3) \\ Q_{out} &= 0,87(1984,4 - 188,45) = 1557,28 \text{ kW}_{te}\end{aligned}\tag{40}$$

$$\begin{aligned}W_p &= \dot{m}(h_4 - h_3) \\ W_p &= 0,87(192,98 - 188,45) = 3,93 \text{ kW}_m\end{aligned}\tag{41}$$

Considerando uma eficiência de 60% na bomba pode-se obter a potência elétrica da bomba com a equação (42).

$$P_p = \frac{W_p}{n} \quad (42)$$

$$P_p = \frac{3,93}{0,6} = 6,55 \text{ kW}_{el}$$

A potência elétrica líquida gerada no sistema pode ser obtida pela subtração da energia consumida pela bomba pela energia gerada, equação (43).

$$P_{lodo} = P_g - P_p \quad (43)$$

$$P_{lodo} = 665,04 - 6,55 = 658,49 \text{ kW}$$

A eficiência térmica do sistema pode ser calculada a partir da equação (44).

$$n = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad (44)$$

$$n = \frac{(2943,1 - 1984,4) - (192,98 - 188,45)}{(2943,1 - 192,98)} = 35\%$$

3.4 INFORMAÇÕES ADICIONAIS PARA A ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS

Além dos potenciais individuais de cada alternativa algumas análises podem ser realizadas e que podem interferir na avaliação técnico financeira. A redução da massa de lodo assim como a associação de tecnologias pode trazer resultados favoráveis dependendo da situação.

Neste sentido foi avaliado também a redução de massa no digestor anaeróbico e a redução de massa de lodo após a secagem térmica.

3.4.1 Redução da massa de lodo no digestor

A redução da massa de lodo no digestor anaeróbico está associada a redução dos sólidos suspensos voláteis e consequente redução dos sólidos totais. A

redução de sólidos totais no processo de digestão anaeróbica pode ser calculada pela equação (45).

$$RSST = \frac{P[\text{kg}/\text{dia}] - mSST_{\text{saída}}[\text{kg}/\text{dia}]}{P[\text{kg}/\text{dia}]} \quad (45)$$

$$RSST = \frac{11542,5 - 6816,00}{11542,5} = 41\%$$

Sendo,

$RSST$ = Redução de sólidos suspensos totais no digestor [%]

P = Produção de lodo em base seca [kg/dia]

$mSST_{\text{saída}}$ = massa de sólidos suspensos Totais na saída do digestor [kg/dia]

3.4.2 Redução da massa de lodo após a secagem térmica.

A queima do lodo na caldeira tanto para o lodo bruto quanto para o lodo digerido resultará em uma grande redução da massa de lodo que seria transportada para destinação final. Não somente isto as cinzas resultantes da queima podem ser utilizadas na produção de cimento e em artigos da construção civil como agregado.

A energia proveniente do lodo vem de sua parte volátil podendo considerar-se que as cinzas resultantes no processo são a massa de sólidos suspensos fixos calculados na equação (27) que é de 3.462,75 kg/dia em material seco.

Considerando que a massa de lodo inicialmente transportada é de 11.542,50 kg/dia em base seca, e que este material normalmente passa apenas pelas etapas de adensamento e desaguamento o material a ser transportado teria 25% de sólidos e o restante sendo água. A massa de lodo a 25% de teor de sólidos foi calculada pela equação (30) onde obteve-se uma massa de 46.170 kg/dia

Com isso pode-se calcular a redução de lodo a ser destinado pela equação (46).

$$Rm_{\text{lodo}} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (46)$$

$$Rm_{\text{lodo}} = \frac{46170 - 3462,75}{46170} = 93\%$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do dimensionamento da ETE teórica baseada na ETE Insular de Florianópolis para atendimento de uma população de 285 mil habitantes obtiveram-se na seção 3.1.1 uma vazão de 406,39 l/s e na seção 3.1.2 carga de SST de 365,26 g/m³ e DBO de 405,84 g/m³.

A produção de excesso de lodo removido do digestor secundário como descrito na seção 3.1.3 foi de 11.542,50 kg/dia com teor de sólidos de 100%. O excesso de lodo teve dois prováveis destinos, a secagem térmica e posterior queima em caldeira para geração de energia ou para o digestor anaeróbico para a produção de 4.632,64 m³/dia de biogás, conforme descrito na seção 3.2.6 e de 6.816,00 kg/dia de lodo digerido com teor de sólidos de 100%, como detalhado na seção 3.3.1.

4.1 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOGÁS

Os resultados para geração de energia a partir dos 4.632,64 m³/dia de biogás produzidos pelos 02 digestores anaeróbicos de 2.564,14 m³ cada com recirculação e controle de temperatura a 35 °C, como descrito na seção 3.2.1, são apresentados na tabela 05.

Tabela 05 – Resultados de geração de energia para o biogás

Sistema	Potência Térmica	Potência Elétrica	Perdas
Caldeira	979,88 kW	-	342.26 kW _{te}
Motogerador	499,16 kW	480,72 kW	342.26 kW _{te}

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020

A manutenção de temperatura do digestor anaeróbico requer uma potência de 342,26 kW_{te} para a manutenção de temperatura de 35° C considerando-se que a menor temperatura da média climática é de 15,2 °C segundo o INMET (2020), conforme detalhado na seção 3.2.7.

A produção de energia exclusivamente térmica a partir da queima de biogás com PCI de 21.500 kJ/m³ em uma caldeira com 85% de eficiência para produção de vapor obteve-se uma potência de 979,88 kW_{te} como detalhado na seção 3.2.8.

Considerando o consumo de 342,26 kW_{te} para o aquecimento do reator obteve-se uma produção líquida de 637,61 kW_{te}. O que nos permite a utilização para outros possíveis setores dentro da estação de tratamento ou o aproveitamento de parte do biogás para utilização como combustível para frota de veículos.

Para a geração de energia elétrica e aproveitamento da energia térmica do biogás com PCI de 21.500 kJ/m³ utilizou-se um motogerador da empresa Caterpillar modelo CG132B-8 com eficiência elétrica de 41,7% obtendo-se uma potência de 480,72 kW_{el} e de eficiência térmica de 43,3% obtendo-se uma potência de 499,16 kW_{te}, conforme descrito na seção 3.2.9. A energia térmica disponível no motogerador atende os requerimento para manutenção da temperatura do digestor

Também foi levado em consideração que a conversão de SSV em biogás ocasiona a redução na massa de lodo em 41% dentro do digestor anaeróbico, conforme detalhado na seção 3.4.1. A redução na massa de lodo propicia a redução de custos e na poluição e riscos associados ao transporte para destinação final.

4.2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO LODO

Os resultados para geração de energia exclusivamente térmica a partir de uma massa de 11.542,5 kg/dia de lodo bruto com PCI de 21.000 kJ/kgSST e de 6816,00 kg/dia de lodo digerido com PCI de 12.000 kJ/kgSST em uma caldeira com eficiência de 85% são apresentados na tabela 06.

Tabela 06 – Resultados queima do lodo em caldeira

Combustível	Potência Térmica (kW)	Perdas (kW)	Potência Líquida (kW)
Lodo bruto	2.384,65	1.458,84	925,80
Lodo digerido	804,67	861,47	-56,8

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020

Para a queima do lodo na caldeira foi necessário a secagem térmica do lodo para que contivesse o menor o volume de água possível já que tanto o lodo bruto quanto o digerido saem do processo de desaguamento com 25% de teor de sólidos. Dentro do secador térmico é possível obter-se lodos com mais de 90% de teor de sólidos e a potência necessária para a secagem do lodo digerido é de 861,47 kW_{te}

como descrito na seção 3.3.1 e para o lodo bruto de 1.458,84 kW_{te} conforme detalhado na seção 3.3.2.

A potência térmica para o lodo digerido queimado em caldeira foi de 804,67 kW_{te} conforme descrito na seção 3.3.3, o que é insuficiente para ao menos realizar a sua secagem resultando em um déficit de 56,8 kW_{te}.

O lodo bruto apresentou potência de 2.384,65 kW_{te} quando queimado na caldeira conforme descrito na seção 3.3.3, o que permite a sua secagem e resulta em uma potência líquida de 925,80 kW_{te}.

Quanto a produção de energia elétrica fora realizado os cálculos com base no modelo ideal de do Ciclo de Rankine apenas para o lodo bruto já que o lodo digerido não consegue produzir energia suficiente para sua secagem e os resultados de produção de energia elétrica em turbina a vapor são apresentados na tabela 07.

Tabela 07 – Resultados geração de energia no Ciclo Rankine Ideal

Combustível	Potência Disponível (kW)	Potência Elétrica (kW)	Potência Térmica (kW)
Lodo bruto	2.384,65	658,49	1.557,28

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020

O lodo bruto tem capacidade de produção de 658,49 kW_{el} utilizando-se uma turbina a vapor de condensação com pressão de entrada de 4,5 MPa e pressão de saída de 0,01 MPa utilizando-se como fluido de trabalho o vapor sobreaquecido a 300 °C proveniente da caldeira com 85% de eficiência e um gerador com 80% de eficiência. A metodologia detalhada se encontra na seção 3.3.4.

A potência térmica disponível no condensador foi de 1.557,28 kW_{te}. Apesar do atendimento a potência de secagem térmica a baixa temperatura não garante a secagem do lodo, sendo necessário a extração de pressão na turbina ou a utilização de outra fonte de energia para o reaquecimento do fluido de trabalho.

A queima do lodo em caldeira também traz o atrativo da grande redução de massa. Atingindo uma redução de 93% na massa considerando que todos os sólidos suspensos voláteis foram queimados restando apenas os sólidos suspensos fixos, conforme descrito na seção 3.4.2.

4.3 COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS E ALTERNATIVAS

A geração de energia líquida exclusiva térmica de 925,80 kW_{te} e no ciclo Rankine com energia elétrica de 658,49 kW_{el} e térmica de 1.557,28 kW_{te} para o lodo bruto foram superiores quando comparados aos valores encontrados para o biogás e lodo digerido.

A redução de massa na queima do lodo de 93% comparado aos 41% da redução no digestor anaeróbicos para a produção de biogás tornam a queima do lodo em caldeira ainda mais atrativo considerando a redução nos custos, a poluição e riscos associados ao transporte do lodo para destinação final.

Como o lodo digerido não consegue atingir energia suficiente para sua secagem a opção conjunta da utilização do biogás e a queima do lodo digerido pode ser uma opção mesmo que fornecendo menor energia exclusivamente térmica com potência líquida de 580,82 kW_{te}. Podendo oferecer redução da massa de lodo equivalente à da queima do lodo bruto de 93% e permitindo o uso de energia térmica em outro ponto da ETE ou o uso do biogás refinado na frota de veículos.

A opção com a produção de biogás pode se tornar mais atrativa caso haja a presença de grande frota de veículos por parte da companhia de saneamento aonde o uso do biogás refinado possa ser utilizado como fonte de combustível. Outra alternativa seria a possível venda do lodo digerido após o processo de higienização para utilização em atividades agrícolas.

Um fator importante a ser levado em consideração na escolha do processo de recuperação energética é a variabilidade do processo de tratamento de esgoto. A mudança de vazão, de SST, de DBO e na eficiência do tratamento podem influenciar na quantidade de lodo a ser produzido e consequente produção de biogás. Não só isso o tipo de tratamento e sua eficiência podem alterar as características do lodo como seu PCI.

Estudo realizado por Hemmati e Abedzadegan (2019) encontraram em dados experimentais um PCI de 15,1 MJ/kg para o lodo bruto seco proveniente de uma ETE de lodos ativados, comparados aos 21 MJ/kg encontrados na literatura e utilizado neste trabalho. Com esses valores encontrado por Hemmati e Abedzadegan teríamos uma potência disponível de 1714,68 kW contra os 2384,65 kW obtidos nos cálculos do presente trabalho o que consequentemente inviabilizaria a alternativa para geração de energia elétrica.

5 CONCLUSÃO

Os resultados da análise do potencial da geração de energia a partir do biogás apresentaram resultados bastante satisfatórios que podem ser aplicados com segurança a estações de tratamento do mesmo porte deste trabalho, possuindo grande potencial na geração de energia elétrica e térmica, além de permitir a utilização do biogás refinado como combustível para frota de veículos.

Quanto aos resultados para o lodo de esgoto, o lodo bruto apresentou excelentes resultados para a produção de energia elétrica e térmica. A variabilidade da qualidade do lodo é de fundamental importância para garantir a aplicabilidade do seu uso. Já o lodo digerido não apresenta resultados interessantes por não possuir potencial disponível suficiente para sua secagem e consequente produção de energia a menos que melhores tecnologias de secagem sejam desenvolvidas.

Dentre os sistemas o autor acredita que a geração de energia através do biogás seja a de melhor aplicabilidade na geração de energia elétrica e térmica. Principalmente que ainda há de se considerar outros fatores como a qualidade da energia para secagem do lodo, a qualidade do lodo a ser utilizado e os possíveis compostos produzidos durante a queima do lodo.

Com isso o estabelecimento de bons resultados para geração de energia em estações de tratamento de esgoto pode proporcionar incentivo aos governos e setores privados no investimento para ampliação no atendimento de sistemas de coleta e tratamento de esgoto no país. Já que a possibilidade da redução de custos ou mesmo a possibilidade de nova fonte de renda pode se tornar atrativo.

Outra consideração é que com a redução de volume de lodo a ser transportado se reduz não só os custos de transporte e disposição do resíduo, como também proporciona benefícios ao meio ambiente, devido ao menor número de viagens realizadas pelo transporte, reduzindo o risco de acidentes e da poluição do ar pela menor queima de combustível para o transporte, pela redução dos possíveis impactos pela contaminação do solo ou do lençol freático nos aterros. Além de que aumenta a vida útil dos aterros sanitários já que se reduz o volume a ser destinado.

No entanto a utilização dos métodos de recuperação de energia precisam ser analisados caso a caso por análise técnica, financeira e social. Já que cada região possui sua especificidade, principalmente levando em consideração os benefícios da

utilização do lodo na agricultura. O que pode trazer maiores benefícios a sociedade do que a simples geração de energia.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de temas para trabalhos futuros:

- Levantamento e comparativo da geração e consumo de energia elétrica e térmica dentro da estação de tratamento de esgoto apresentados neste trabalho.
- Levantamento dos custos de implantação e operação dos sistemas de geração de energia apresentados neste trabalho.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGESAN. **Fiscalização INICIAL dos Serviços de Saneamento Básico**. Florianópolis: [s.n.].

AGESAN. **Relatório de Fiscalização INICIAL dos Serviços de Saneamento Básico**. Florianópolis: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.aresc.sc.gov.br/index.php/documentos/relatorios-de-fiscalizacao-de-municipios-conveniados/municipios-agua/florianopolis/1255-relatorio-de-fiscalizacao-inicial-florianopolis-gefis-018-2017-e-tas-078/file>>.

ALVES FILHO, A. **Desinfecção de lodo de esgoto anaeróbio para fins agrícolas**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

DAVID, A. C. Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio. **Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica**, p. 163, 2002.

ĐURĐEVIĆ, D.; BLECICH, P.; JURIC, Ž. Energy recovery from sewage sludge: The case study of Croatia. **Energies**, v. 12, n. 10, 2019.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. [s.l.: s.n.].

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. DA. **MANUAL PRÁTICO PARA COMPOSTAGEM DE BÍOSSÓLIDOS**. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

FNR. Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização. **Gülzow**, v. 5, p. 233, 2010.
GHINI, R. **Solarização Do Solo**. Jaguariuna: [s.n.]. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Ghini_solarizacaoID-VArAMJxNVp.pdf>. Acesso em: 22 set. 2019.

HEMMATI, A.; ABEDZADEGAN, T. Comparison of Different Methods (Digestion , Combustion , Gasification , and Pyrolysis) for Sludge Energy Recovery : A Case Study for Ekbatan ' s Municipal Treatment Plant. **Iranian Journal of Chemical Engineering**, v. 16, n. 1, 2019.

INÁCIO, C. DE T.; MILLER, P. R. M. **COMPOSTAGEM: Ciência e prática para gestão de resíduos orgânicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2009.

LARA, A. I. et al. **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: [s.n.].

NETTO, J. M. DE A. et al. Sistemas de Esgoto Sanitário. In: 2. ed. São Paulo: CETESB, 1997.

NOGUEIRA, L. A. H. **Eficiência Energética no Uso do Vapor**. Rio: [s.n.].
PÉRICO, G. **AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE DQO E SST NA ETAPA BIOLÓGICA DA ETE DO RESORT COSTÃO DO SANTINHO EM FLORIANÓPOLIS/SC**. [s.l.]

UFSC, 2009.

ROSA, A. P. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores uasb como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SANEPAR. Agricultores aplicam lodo de esgoto da Sanepar na safra 2019/2020. 2019.

SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics.** 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006.

SIEMENS. **The next generation of Siemens advanced air-cooled gas turbines.** Disponível em: <<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt5-9000hl.html>>.

TCHOBANOGLIOUS, G. et al. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.

TERRA DA AGRICULTURA. **O QUE É SOLARIZAÇÃO DE SOLOS.** Disponível em: <<http://terradaagricultura.blogspot.com/2012/12/o-que-e-solarizacao-de-solos.html>>. Acesso em: 22 set. 2019.

WWAP, (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESMENT PROGRAMME). **The United Nations World Water Development Report 2017 - Wastewater The Untapped Resource.** Paris: [s.n.].

WYLEN, G. J. VAN; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica.** 6. ed. São Paulo: EdigarBlucher Ltda, 2003.