

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

**PROJETO DE UM SISTEMA ANAERÓBIO PARA ESTABILIZAÇÃO DE LODO E
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA**

Claudio Cezar de Souza Junior

Rio Claro (SP)

2012

CLAUDIO CEZAR DE SOUZA JUNIOR

**PROJETO DE UM SISTEMA ANAERÓBIO PARA
ESTABILIZAÇÃO DE LODO E RECUPERAÇÃO DE
ENERGIA**

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)
2012

CLAUDIO CEZAR DE SOUZA JUNIOR

PROJETO DE UM SISTEMA ANAERÓBIO PARA
ESTABILIZAÇÃO DE LODO E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Campus de Rio Claro (SP), da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.*

Comissão Examinadora

Marcelo Loureiro Garcia (orientador)
Emerson Marçal Junior
Francisco José da Silva

Rio Claro, 14 de Novembro de 2012.

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

RESUMO

O tratamento dos efluentes domésticos e industriais através das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) gera um resíduo denominado lodo de esgoto, rico em matéria orgânica, de grande volume e ocasionalmente contendo patógenos e metais pesados. A geração do lodo pode minimizar os benefícios trazidos pela coleta e tratamento de esgotos, visto que esse resíduo nem sempre recebe o tratamento adequado antes da disposição final. A disposição final também é outra problemática relacionada ao lodo. Aterros sanitários geralmente não dispõem de espaço físico e alternativas como o uso na agricultura requerem um tratamento intenso que pode ser em muitos casos inviável operacional ou economicamente. Este trabalho tem por objetivo a investigação teórica a respeito dos processos de estabilização do lodo por meio da digestão anaeróbia, bem como a atividade metanogênica no decorrer do processo. Através da análise de cada etapa e contemplando cada fator relevante no processo de digestão anaeróbia a fim de otimizá-los, propôs-se um modelo teórico de reatores capaz de promover a estabilização do lodo, bem como reduzir seu volume e eliminar os patógenos. A configuração obtida consiste de dois reatores anaeróbios conectados em série, sendo o primeiro operando na faixa mesofílica de temperatura (35°C) e com maior tempo de detenção hidráulica (25 dias) atuando primordialmente na estabilização da matéria orgânica presente no lodo e produzindo biogás, enquanto o segundo opera na faixa termofílica (55°C) no intuito de eliminar os patógenos, reduzir o volume e dar sequência a estabilização. O tempo de detenção hidráulica do segundo reator é menor (10 dias). Ambos os processos mesofílico e termofílico mostraram-se eficientes no que foi proposto, promovendo a estabilização da matéria orgânica presente no lodo e redução significativa dos patógenos. Como etapa final e com o lodo previamente digerido, indica-se um último método de desidratação, que são os leitos de secagem, a fim de se obter a máxima redução volumétrica. O reaproveitamento energético provém da utilização do biogás gerado no decorrer do processo de digestão anaeróbia, potencial gerador de calor, energia elétrica e/ou mecânica.

Palavras chave: lodo de esgoto, digestão anaeróbia, estabilização do lodo, reator anaeróbio.

ABSTRACT

The treatment of domestic and industrial effluents through Wastewater Treatment Plants (WTPs) generates a residue termed sewage sludge, rich in organic matter, high-volume, occasionally containing pathogens and heavy metals. The sludge generation can minimize the benefits brought by the treatment of sewage, because this residue does not always receive appropriate treatment before final disposal. The disposal is another problem related to sludge. Landfills generally does not have physical space and alternatives such as the use in agriculture requires an intense treatment that could be in many cases operational or economic unfeasible. The objective of this work is the theoretical research about the processes of stabilization of the sludge by anaerobic digestion and the methanogenic activity during the process. Through analysis of each step and contemplating each relevant factor in anaerobic digestion process in order to optimize them, we proposed a theoretical model of reactors capable of stabilize the sludge, reduce its volume and eliminate pathogens. The obtained configuration consists of two anaerobic reactors connected in series. The first one operates in the range mesophilic temperature (35 ° C) and has higher hydraulic retention time (25 days) working primarily in the stabilization of organic matter present in the sludge and producing biogas, whereas the second one operates in the thermophilic range (55 ° C) in order to eliminate pathogens, and to reduce the volume. The hydraulic retention time in the second reactor is lower (10 days). Both mesophilic and thermophilic processes were efficient in what was proposed, promoting the stabilization of organic matter present in the sludge and significant reduction of pathogens. As a final step with the sludge previously digested, it is indicated a final dehydration method, which are the drying beds in order to obtain maximum volumetric reduction. The reuse energy comes from utilizing biogas produced during the anaerobic digestion process, potential generator of heat, electric or mechanical energy.

Keywords: sewage sludge, anaerobic digestion, sludge stabilization, anaerobic reactor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema básico da digestão anaeróbia.....	11
Figura 2. Produção de metano otimizada.....	16
Figura 3. Sistema de digestão anaeróbia em operação.....	22
Figura 4. Vedação das extremidades do sistema.....	23
Figura 5. Modelo de estrutura cilíndrica e <i>egg shaped</i> de reatores.....	24
Figura 6. Representação da configuração de reatores anaeróbios obtida.....	34
Figura 7. Esquema de um leito de secagem.....	35
Figura 8. Gás produzido (ml) em função do tempo (dias).....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de lodo de esgoto – RESOLUÇÃO CONAMA nº 375.....	10
Tabela 2 - Composição média do biogás.....	12
Tabela 3 - Principais fatores dos processos de desaguamento de lodos.....	15
Tabela 4 - Concentrações inibitórias dos principais metais pesados encontrados no lodo de esgoto.....	27
Tabela 5 - Lista de algumas propriedades do lodo de esgoto secundário	30
Tabela 6 - Propriedades do biogás.	30
Tabela 7 - Resultado da determinação de ST, SV e SF para os lodos aeróbio e anaeróbio.....	36
Tabela 8 - Resultado da determinação de ST, SV e SF do lodo anaeróbio pós tratamento.....	37
Tabela 9 - Valores para coliformes totais e <i>E. coli</i> obtidos antes do tratamento.....	38
Tabela 10 - Valores de pH para o lodo anaeróbio antes e após o tratamento.....	38

SUMÁRIO

1. Introdução.....	8
1.1 Alternativa do uso de lodos estabilizados nos solos.....	10
1.2 Fundamentos da digestão anaeróbia e produção de biogás.....	11
2. Objetivos.....	12
3. Revisão Bibliográfica.....	13
3.1 Exemplos de pré-tratamentos descritos na literatura.....	15
4. Material e métodos.....	17
4.1 Materiais e equipamentos utilizados.....	18
4.2 Ensaio laboratoriais.....	19
4.2.1 Coleta do lodo.....	19
4.2.2 Determinação de sólidos pelo método gravimétrico.....	20
4.2.3 Análise de patógenos.....	20
4.2.4 Arranjo do sistema e monitoramento do processo.....	21
5. Resultados e discussão.....	23
5.1 Considerações e parâmetros avaliados para o desenvolvimento do modelo.....	24
5.1.1 Tipo do reator.....	24
5.1.2 Temperatura e tempo de retenção hidráulica.....	25
5.1.3 Potencial Hidrogeniônico – pH.....	26
5.1.4 Metais pesados e potenciais inibidores do processo de digestão anaeróbia.....	27
5.1.5 Mistura e homogeneidade.....	28
5.1.6 Reaproveitamento energético.....	29
5.1.7 Redução volumétrica do lodo.....	32
5.2 Apresentação do modelo.....	32
5.3 Ensaio Laboratoriais.....	36
5.3.1 Determinação de sólidos pelo método gravimétrico.....	36
5.3.2 Análise de patógenos.....	37
5.3.3 Potencial Hidrogeniônico.....	38
5.3.4 Produção de biogás.....	39
5.3.5 Redução Volumétrica.....	39
6. Recomendações.....	40
7. Conclusão.....	41
8. Referências Bibliográficas.....	42

1. INTRODUÇÃO

Os esgotos urbanos e industriais são os principais poluidores dos mananciais hídricos e, portanto, esses efluentes devem ser sujeitos a um tratamento adequado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) antes de serem despejados em corpos receptores. Todos os sistemas de tratamento de esgotos geram subprodutos sólidos: material gradeado, areia, espuma, lodo primário, lodo secundário e lodo químico, este último diferenciado pela utilização de coaguladores ou reagentes químicos que estimulam a precipitação de substâncias da fase líquida. O material gradeado, areia e espuma seguem para disposição final em aterros sanitários, enquanto que os lodos exigem tratamento prévio à disposição final, pois são ricos em material orgânico e demasiadamente volumosos devido à grande quantidade de água em sua composição, até 97% (ANDREOLI *et al*, 2001), e apresentam maior massa que os demais subprodutos sólidos. Além disso, existe a potencial presença de metais pesados e patógenos nos lodos.

Os diversos sistemas de tratamento de esgoto não contemplam o destino final para o lodo produzido. O tratamento do lodo deve ser executado para minimizar problemas como odor excessivo e disposição de poluentes e substâncias patogênicas no meio ambiente, além da diminuição do volume do material a ser disposto. Atualmente, grande parte do lodo produzido é destinada a aterros sanitários em co-disposição com resíduos sólidos urbanos. Esta pode não ser a melhor destinação para o resíduo, pois o lodo se trata de um resíduo volumoso e hidrófilo, proporcionando gastos elevados para a ETE em termos de transporte e acondicionamento. Além disso, podem ocasionar problemas estruturais como recalques dos taludes dos aterros caso adquiram umidade excessiva e são resíduos com alto potencial de produção de chorume, sem mencionar o fato de que a disposição final em aterro sanitário é das menos nobres, uma vez que o lodo estabilizado e livre de patógenos pode ser reciclado no uso agrícola (OLESZKIEWICZ & MAVINIC, 2002).

A incorporação do lodo de esgoto no solo é uma alternativa bastante promissora, pois o lodo contém percentual considerável de matéria orgânica e de elementos essenciais para as plantas, podendo substituir, ainda que parcialmente, os fertilizantes minerais (NASCIMENTO *et al.*, 2004). Por se tratar da disposição final de maior sustentabilidade ambiental a possibilidade da aplicação do lodo no solo é discutida posteriormente (subseção 1.1 *Alternativa do uso de lodos estabilizados nos solos*).

De acordo com Rocha e Shirota (1999) a incineração também pode ser considerada

alternativa de disposição final para o lodo, mas os elevados custos financeiros e obstáculos operacionais dificultam a utilização do processo em larga escala.

Segundo Andreoli *et al.* (2001), as principais etapas do gerenciamento do lodo, com as respectivas definições são as seguintes:

- Adensamento – remoção de umidade por gravidade ou centrifugação (redução de volume).
- Estabilização – remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
- Condicionamento – preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
- Higienização – remoção de organismos patogênicos
- Desaguamento – remoção da umidade através de leitos de secagem, filtros a vácuo, prensas desaguadoras ou filtros prensa (redução de volume)
- Disposição final – destinação final dos subprodutos

A disposição final dos lodos gerados nos processos de tratamento de efluentes é praticada muitas vezes de forma não controlada, ou seja, não segue as etapas de gerenciamento descritas acima. Este estudo visa o desenvolvimento de um modelo de reator anaeróbio que seja viável e eficiente, no intuito de otimizar a estabilização de lodos produzidos em plantas de tratamento de efluentes e produzir de maneira eficaz um resíduo mais compacto e “limpo”.

A configuração de reatores anaeróbios obtida apresenta as etapas de adensamento (por gravidade), estabilização da matéria orgânica, higienização e desidratação, além da capacidade de reaproveitamento energético através da queima do biogás gerado no decorrer do processo. Para o desenvolvimento do modelo estudou-se os conceitos e parâmetros envolvidos na estabilização de lodos através de revisão bibliográfica criteriosa para se estabelecer a base teórica para a formulação da configuração dos reatores. O processo chave no modelo criado para o tratamento e estabilização do lodo é a digestão anaeróbia, a qual tem seus fundamentos descritos na subseção 1.2 *Fundamentos da digestão anaeróbia e produção de biogás*. Foram também realizados ensaios de laboratório para testar a eficiência do modelo, tendo como parâmetros de avaliação do desempenho a estabilização da matéria orgânica, a eliminação de patógenos e a redução volumétrica.

1.1 Alternativa do uso de lodos estabilizados nos solos

O lodo de esgoto é considerado uma fonte valiosa de recursos, sendo o produto final, ou seja, estabilizado e livre de patógenos, um dos melhores condicionantes do solo e fonte de nutrientes e micro elementos (OLESZKIEWICZ & MAVINIC, 2002), justificando a incorporação deste resíduo nos solos, seja na recuperação de áreas degradadas ou no uso propriamente agrícola. Porém, esta é uma alternativa que também apresenta problemas, como a possibilidade da presença de metais pesados e acumulação destes no meio ambiente, contaminação do solo por substâncias indesejáveis e patógenos são alguns fatores que podem inviabilizar o uso agrícola do lodo. Em decorrência desses fatores é fundamental o tratamento intensivo do lodo previamente a disposição no solo.

Bezerra *et al.* (2006) melhoraram os aspectos de fertilidade de solo degradado através da adição de lodo de esgoto estabilizado, aumentando significativamente teores de carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, magnésio, potássio e cálcio, bem como da capacidade de troca catiônica.

Nascimento *et al.* (2004) avaliaram as alterações químicas e o crescimento de culturas de milho e feijão após a adição do lodo tratado ao solo. Concluíram que as plantas de milho e feijoeiro responderam positiva e significativamente às doses de lodo adicionadas ao solo, com aumentos da produção de massa seca, indicando o potencial fertilizante do resíduo.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama – classificou o lodo em duas classes: A e B, de acordo com seus índices bacteriológicos e patogênicos. A Tabela 1 mostra as concentrações relativas a cada classe:

Tabela 1. Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos, descritos na RESOLUÇÃO CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliforme Termotolerantes $<10^3$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos $<0,25$ ovo / g de ST
	Salmonella ausência em 10 g de ST
	Vírus $<0,25$ UFP ou UFF /g de ST
B	Coliforme Termotolerantes $<10^6$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos <10 ovos / g de ST

Legenda: ST: Sólidos Totais, NMP: Número Mais Provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa

A partir de 2011, apenas lodo classe A, isto é, aquele de caráter mais restritivo em relação à presença de patógenos e coliformes termotolerantes poderão ser aplicados no solo para fins agrícolas.

1.2 Fundamentos da digestão anaeróbia e produção de biogás

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural, no qual bactérias interagem para promover a fermentação estável e auto-regulada da matéria orgânica na ausência de oxigênio molecular. Apesar de relativamente lenta, oferece diversas vantagens no tratamento de lodos de esgoto. Inclui-se nessas vantagens o alto grau de estabilização, capacidade de tratar lodos com altas cargas de material orgânico, pequena produção de rejeitos e produção de gás metano como produto final de decomposição (STERRITT & LESTER, 1988).

A digestão anaeróbia é um processo altamente complexo e é formada basicamente por quatro etapas principais (GUJER & ZENHDER, 1983; MCCARTY & SMITH, 1986): hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de modo que pelo menos cinco grupos de microrganismos participam do processo (Figura 1).

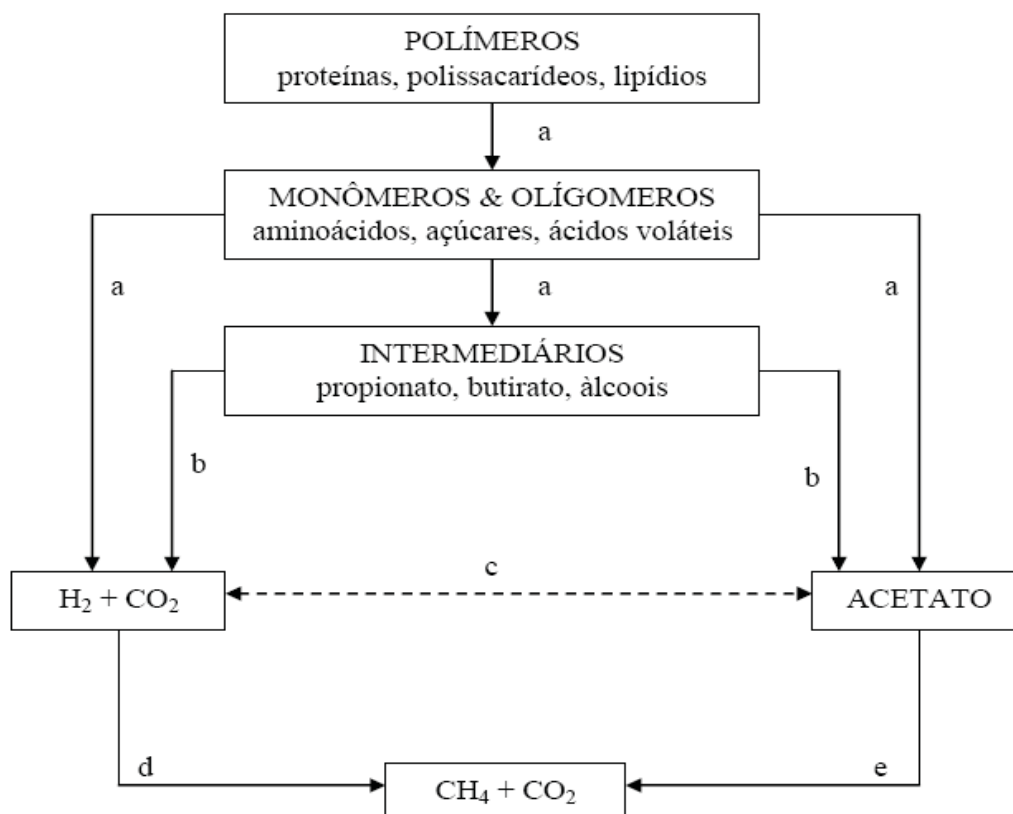


Figura 3. Esquema básico da digestão anaeróbia. Adaptado de McCarty & Smith (1986)

O grupo *a* representa bactérias hidrolíticas e fermentativas, as quais participam das etapas de hidrólise e de acidogênese. Estas bactérias transformam carboidratos, proteínas e lipídios em ácidos voláteis, álcoois, gás carbônico, hidrogênio, acetato, amônia e gás sulfídrico. O grupo *b* é formado por bactérias acetogênicas (etapa de acetogênese), as quais transformam os produtos da hidrólise e acidogênese em ácido acético, hidrogênio e gás carbônico. O grupo *c* engloba as bactérias homoacetogênicas, responsáveis pela formação de ácido acético a partir de hidrogênio e *vice versa*, isto é, homoacetogênese em reverso. Os grupos *d* e *e* são formados por arqueias metanogênicas, as quais diferem quanto ao tipo de substrato utilizado para a produção de metano. Enquanto o grupo *d* é formado por metanogênicas hidrogenotróficas (as quais convertem hidrogênio e gás carbônico em metano), o grupo *e* inclui metanogênicas acetoclásticas (as quais convertem acetato em metano). O biogás formado no processo anaeróbico é geralmente composto de 60 a 80% de metano.

Um dos produtos finais gerados na digestão anaeróbia é o biogás. Biogás é a mistura gasosa composta basicamente por dióxido de carbono e metano, como ilustra a Tabela 2. O componente de maior interesse na mistura é o metano, devido ao seu alto poder calorífico e potencial energético (IGONI *et al.*, 2008).

Tabela 2. Composição média do biogás. Adaptado de Igoni *et al.* (2008).

Constituinte	Composição
Metano (CH ₄)	55 – 75%
Dióxido de carbono (CO ₂)	30 – 45%
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	1 – 2%
Nitrogênio (N ₂)	0 – 1%
Hidrogênio (H ₂)	0 – 1%
Monóxido de carbono (CO)	Traços
Oxigênio (O ₂)	Traços

2. OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi o desenvolvimento de um modelo teórico de reatores anaeróbios visando à digestão e estabilização do lodo, eliminação de patógenos, redução de volume e reaproveitamento energético, além da execução de ensaios laboratoriais no intuito de testar a eficiência da configuração de reatores proposta. Para tal, têm-se os seguintes

objetivos específicos:

- Conhecer o estado-da-arte do tema através do levantamento bibliográfico sobre processos de estabilização do lodo via digestão anaeróbia. Busca de artigos científicos que tragam informações e resultados relacionados aos aspectos acima mencionados.
- Propor um modelo teórico de reator anaeróbio inovador para estabilização de lodos que contemple os parâmetros mencionados acima, como estabilização da matéria orgânica, eliminação de patógenos, redução de volume e reaproveitamento energético.
- Realizar ensaios laboratoriais visando à avaliação do desempenho do modelo teórico proposto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta as pesquisas que efetivamente contribuíram para a elaboração da configuração de reatores proposta por este trabalho, bem como uma breve explanação acerca dos resultados obtidos pelos autores de tais pesquisas. Os trabalhos descritos abaixo foram decisivos para o desenvolvimento do design e escolha dos métodos utilizados no modelo, porém não representam a totalidade dos trabalhos pesquisados.

Oleszkiewicz e Mavinic (2002) e Dichtl (1997) apresentam a estrutura *egg shaped* de reatores como ideal, devido à maior superfície de contato que essa estrutura promove entre o lodo e os microrganismos em decorrência da possibilidade de instalação de sistemas eficientes de mistura, como tubos de propulsão, que garantem a homogeneidade do substrato, além de evitar a formação de espuma e depósitos de sólidos na base do reator.

A alternativa tratada por Zupancic *et al.* (2008) foi a adição de resíduos orgânicos domiciliares ao lodo de esgoto e este submetido posteriormente à digestão anaeróbia mesofílica com tempo de retenção hidráulica de 20 dias. Obteve-se aumento na produção de metano em 80% e o gás foi utilizado na produção de calor e energia elétrica. Esta alternativa pode ser eventualmente testada e incorporada ao modelo devido à facilidade de aplicação e dos resultados satisfatórios obtidos. Zupancic *et al.* (2008) também demonstraram a utilização de boiler alimentado por biogás fornecendo água aquecida para trocadores de calor a fim de realizar a adequação da temperatura do lodo.

Plachá *et al.* (2008) avaliaram a eficiência do tratamento mesofílico aeróbio e adição de cal hidratada na desinfecção de lodos de esgoto. Os resultados mostraram que a

estabilização aeróbia mesofílica não demonstrou efeitos de desinfecção suficientes. A adição de cal obteve melhores resultados de higienização, porém com maiores custos. Dessa forma, é viável apenas para a disposição final do lodo em solos ácidos, uma vez que haveria economia em termos de adequação do pH do solo por meio de outros métodos.

Oliveira *et al.* (2002) estudaram os efeitos da aplicação do lodo em esgoto em latossolo amarelo distrófico cultivado com cana de açúcar. A higienização do lodo de esgoto anaeróbio foi efetuada eficientemente através da adição de cal hidratada, porém o autor não tratou a respeito da viabilidade econômica da mesma. De maneira análoga Nascimento *et al.* (2004) estudaram a aplicação do lodo de esgoto higienizado por cal hidratada no solo cultivado com feijão e milho, demonstrando que este processo de desinfecção é utilizado na maioria dos casos em que a destinação final do lodo é agrícola.

Appels *et al.* (2008) estudaram os princípios da digestão anaeróbia, bem como todos os parâmetros envolvidos e a interferência dos mesmos no processo. Dentre diversos fatores pesquisados, provaram que a digestão anaeróbia mesofílica é capaz de remover boa parte dos patógenos e o aumento da temperatura promove altas taxas de destruição de microrganismos patogênicos.

Song *et al.* (2004) realizaram ensaios com lodo de esgoto visando à obtenção de lodos Classe A, ou seja, lodos com caráter restritivo em relação à presença de patógenos e coliformes termotolerantes e que podem ser utilizados para fins agrícolas. A partir da digestão mesofílica, a porcentagem de inativação dos coliformes totais foi de 66.7%, enquanto com a digestão termofílica a porcentagem obtida foi de 99.7%, mostrando-se um processo extremamente eficiente para higienização do lodo. A digestão mesofílica apesar de não eliminar patógenos de maneira tão eficiente quanto à termofílica, é particularmente importante por apresentar maior rendimento na produção de metano, além de ser mais estável caso haja variações das condições físicas e químicas dentro no reator (SONG *et al.*, 2004).

Andreoli *et al.* (2001) apresentam diversos processos e operações para a realização do desaguamento do lodo, são eles: leitos de secagem, centrífugas, filtros a vácuo, prensas desaguadoras e filtros prensa. A Tabela 3, adaptada de Andreoli *et al.* (2001) relaciona as principais características dos processos de desaguamento de lodos.

Tabela 3. Principais fatores dos processos de desaguamento de lodos. I – pouco, reduzido. II – moderado. III – grande, elevado. Fonte: Andreoli et. al. (2001).

Fatores	Leitos de secagem	Centrífugas	Filtros a vácuo	Prensas desaguadoras	Filtros prensa
Demanda de área	III	I	II	I	I
Demanda de energia	Nenhuma	II	III	II	III
Custo de implantação	I	III	II	II	II
Demanda de manutenção	I	II	II	III	III
Sensibilidade a qualidade do lodo	I	III	II	II	II
Teor de ST na torta	III	II	I	II	III
Influência do clima	III	I	I	I	I
Complexidade de remoção do lodo	II	I	I	I	I

3.1 Exemplos de pré-tratamentos descritos na literatura

Apesar de não incorporados ao modelo em decorrência de limitações técnicas que estão descritas em maiores detalhes na seção subsequente, foram estudados alguns pré-tratamentos que podem ser aplicados ao lodo e as consequências promovidas por estes, em particular, a alternativa da produção sequencial de hidrogênio e metano, mediante inoculação de bactérias produtoras de hidrogênio em conjunto com pré tratamentos inibitórios a ação de arqueias metanogênicas.

Ting e Lee (2007) estudaram a produção sequencial de hidrogênio e metano a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto pré tratado e inoculado com uma cepa de *Clostridium*. Três pré-tratamentos foram testados: alcalinização, acidificação e congelamento/descongelamento. A inoculação de *Clostridium* tem por finalidade a produção de gás hidrogênio, enquanto que os pré-tratamentos visam a inibição temporária da produção de metano. Os resultados experimentais obtidos demonstraram a viabilidade da utilização de dois reatores em série produzindo hidrogênio e metano separadamente. A fermentação do lodo alcalinizado e inoculado previamente aumentou a produção de metano em 500% (TING & LEE, 2007) como mostra a Figura 2.

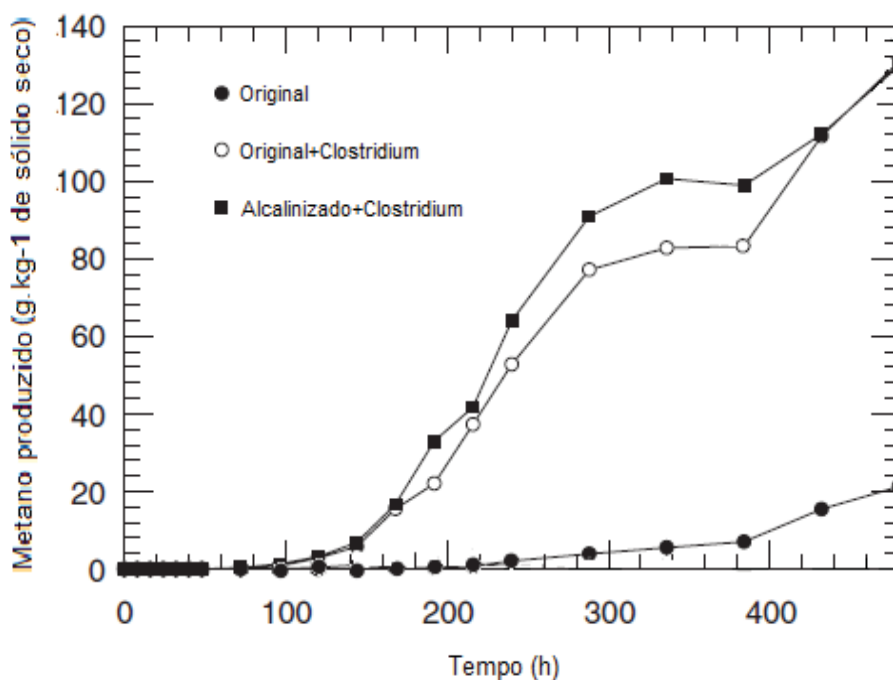


Figura 4. Produção de metano otimizada através da inoculação de *Clostridium* ao lodo e alcalinização do mesmo com NaOH. Adaptado de Ting e Lee (2007).

Park *et al.* (2010) também realizaram estudos acerca de um sistema de duas fases sequenciais com produção de hidrogênio e metano. No intuito de inativar a atividade das arqueias metanogênicas no primeiro estágio, realizaram pré tratamento térmico, submetendo o lodo à temperatura de 100°C durante 30 min. As bactérias do gênero *Clostridium* produtoras de hidrogênio permaneceram ativas por serem bastante tolerantes ao calor. Demonstraram a eficiência do processo, otimizando a produção de ambos os gases e reduzindo significativamente a DBO do lodo.

Bougrier *et al.* (2006) avaliaram e compararam os efeitos na digestão anaeróbia de três pré tratamentos ao lodo: ultrassom, ozonificação e tratamento térmico com temperaturas entre 170 e 190°C. Em termos de degradação e estabilização da matéria orgânica, o ultrassom e o tratamento térmico mostraram-se os melhores pré tratamentos. Porém, os autores não concluíram qual seria a melhor opção dentre os dois, pois os resultados foram demasiadamente semelhantes, incluindo as alterações físicas e químicas do lodo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A primeira etapa da pesquisa envolveu o desenvolvimento conceitual do tema a partir do levantamento bibliográfico entre livros e artigos científicos e na análise criteriosa destes. Foram estudados os métodos e sistemas utilizados para estabilização de lodos, levando-se em consideração principalmente os aspectos de redução de volume, remoção de patógenos e substâncias indesejáveis, bem como a composição do lodo antes, durante e após o processo. Foram analisadas também as alternativas de reaproveitamento energético a partir do biogás gerado no processo anaeróbio.

O desenvolvimento do modelo foi feito de maneira a aproveitar as vantagens dos processos e operações, minimizando as desvantagens dos mesmos, focado na viabilidade da realização dos testes experimentais em escala de bancada.

A análise do trabalho de Appels *et al.* (2008) permitiu a definição da primeira etapa do modelo, adensamento por meio da gravidade, por se tratar de uma operação de baixo custo e relativamente eficiente. Além disso, pôde-se iniciar a definição por dois reatores sequenciais, na medida em que a digestão termofílica é apresentada como alternativa eficiente na eliminação de patógenos.

O trabalho de Oleszkiewicz e Mavinic (2002) possibilitou a definição do formato *egg shaped* dos reatores.

A utilização do boiler alimentado por biogás e trocadores de calor operando com água aquecida para realizar a adequação da temperatura do lodo foram definidas a partir dos estudos de Zupancic *et al.* (2006).

Com o propósito de determinar um método eficiente para eliminação de patógenos, foram avaliados os estudos executados por Plachá *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2002), Nascimento *et al.* (2004), Appels *et al.* (2008) e Song *et al.* (2004).

Após passar pelos estágios de adensamento, digestão mesofílica promovendo estabilização da matéria orgânica e produção de metano, digestão termofílica dando continuidade a estabilização e atuando principalmente na desinfecção do lodo, definiu-se o método utilizado para realizar a desidratação do lodo, para que o produto final apresente redução máxima do volume, facilitando o transporte e a disposição do mesmo, independentemente da alternativa escolhida. Andreoli *et al.* (2001) apresenta diversos processos para o desaguamento de lodos (Tabela 3). A partir das características de cada processo, buscando aliar eficiência na desidratação (teor de ST na torta) e viabilidade econômica (demanda de energia, custo de implantação, demanda de manutenção), definiu-se o leite de secagem como melhor opção.

Os ensaios laboratoriais foram realizados de modo a adaptar a configuração teórica de reatores proposta em escala de bancada, focando uma representação mais próxima da realidade nas condições de temperatura, mistura e tempo de retenção hidráulica da digestão anaeróbia mesofílica e termofílica. Para análise e avaliação do desempenho do processo, quantificou-se, de acordo com metodologias descritas a seguir, sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) presentes no lodo antes e após o processo. O segundo parâmetro envolvido na avaliação do desempenho do reator foi a quantidade de patógenos presentes no mesmo, a qual, de forma análoga a análise de SF e SV, foi mensurada antes e após o tratamento anaeróbio.

4.1 Materiais e equipamentos utilizados

Para a execução das análises do lodo, prévias e posteriores ao processo de digestão anaeróbia, bem como para o arranjo do modelo em escala de bancada foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- Placa aquecedora e agitadora IKA C-MAG HS7
- Medidor de gás Ritter MGC-1 V3.0 PMMA
- Estufa EDGCON
- Balança Marte AY 220
- Mufla EDGCON 3P
- Kitassato de 500ml Satelit
- pHmetro
- Cadinhos
- Dessecador
- Rolhas
- Garrafa plástica
- Silicone transparente Tek Ved
- Mangueiras de silicone
- Béquer de 50 ml Satelit

4.2 Procedimentos experimentais

Os ensaios de laboratório podem ser descritos em quatro etapas sequenciais, são elas a coleta do lodo, análises do lodo antes do processo de digestão anaeróbia, arranjo e monitoramento do sistema e análises do lodo após o tratamento.

4.2.1 Coleta do lodo

A coleta do lodo utilizado na pesquisa foi realizada na ETE de Araraquara-SP, cidade de 190.000 habitantes que possui 98% do esgoto coletado e tratado. A ETE apresenta processo de tratamento dotado de lagoas de aeração e de sedimentação. Inicialmente realiza-se o tratamento preliminar através de um sistema de gradeamento de 20 mm e uma caixa de areia, que removem os detritos mais grosseiros e areia, ambos dirigidos ao aterro sanitário. Após passar por este tratamento preliminar, os esgotos são encaminhados para as lagoas de aeração com tempo de detenção médio de três dias. A próxima e última etapa do tratamento são as lagoas de sedimentação. Nestas lagoas os sólidos sedimentáveis presentes no efluente das lagoas aeradas se depositam no fundo formando o lodo anaeróbio. Pôde observar que a lagoa de aeração apresentava possivelmente zonas mortas de degradação. A aeração é feita através de aeradores submersos do tipo spray. Porém, estes estão instalados apenas nas regiões centrais da lagoa. Este fato pode implicar na formação de zonas mortas de degradação nas bordas das lagoas ou criar áreas com alta concentração de areia, pois a mistura completa também fica comprometida. A lagoa de aeração tem capacidade de 103.000,0 m³, o suficiente para um tempo de detenção médio de 3 dias, considerando a vazão nominal média de cada módulo de 400,0 L/s. A lagoa de sedimentação tem volume útil de 57.600 m³, o suficiente para proporcionar um tempo de detenção de 1,7 dia, considerando a vazão nominal de 400,0 L/s. O efluente da lagoa de sedimentação é enviado para o Ribeirão das Cruzes, um curso d'água classe 3. Atualmente, a ETE de Araraquara atende à legislação estadual (respeita o decreto Estadual 8468), ou seja, remoção de DBO acima de 80%.

Foram amostrados aproximadamente três litros de lodo de cada uma das lagoas, sendo que da lagoa de aeração foi amostrado o lodo aeróbio e da lagoa de sedimentação amostrou-se o lodo anaeróbio. A coleta foi feita de maneira direta, utilizando-se uma pá de comprimento suficiente para alcançar o fundo da lagoa de aproximadamente quatro metros de profundidade,

além de um funil e dois recipientes plásticos de três litros de capacidade cada. Enquanto não utilizado nos ensaios, o lodo foi armazenado em geladeira.

4.2.2 Determinação de sólidos pelo método gravimétrico

As determinações de sólidos fixos e voláteis presentes nos lodos aeróbio e anaeróbio provenientes da ETE de Araraquara/SP foram realizadas antes e após o processo de digestão anaeróbia através das diretrizes presentes em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005). A determinação da relação Sólidos voláteis (SV) / Sólidos totais (ST) é importante, uma vez que é um dos parâmetros de avaliação de desempenho do modelo proposto. Além disso, o valor da relação foi decisivo na escolha do tipo de lodo utilizado nos ensaios, uma vez que não havia equipamentos disponíveis, tampouco tempo hábil para a execução dos ensaios de digestão anaeróbia para os dois tipos de lodo de esgoto coletados. Por último, salienta-se que quanto maior o valor desta relação, maior a quantidade de matéria orgânica presente no lodo.

A determinação dos sólidos totais (ST) de acordo com a NBR 10664 (1989) consiste na transferência de uma porção homogênea da amostra (lodo) de volume adequado para uma cápsula de evaporação previamente tarada. A amostra é evaporada e seca em estufa à temperatura de 103°C a 105°C. A quantidade de massa em relação à massa da cápsula vazia corresponde aos sólidos totais (ST). O resíduo obtido na determinação dos sólidos totais (ST) é submetido à calcinação a $(550 \pm 50)^\circ\text{C}$. O material restante representa os sólidos fixos (SF). Os sólidos voláteis (SV) são obtidos através da diferença entre os valores de ST e SF.

4.2.3 Análise de patógenos

Para realizar detecções e quantificações simultâneas de coliformes totais e *E. coli* presentes nos lodos aeróbio e anaeróbio, foi utilizado o kit Colilert[®] (sistema patenteado por IDEXX Laboratories), pela simplicidade de verificação e confiabilidade dos valores obtidos. O Colilert[®] utiliza nutrientes (açúcares ligados a radicais orgânicos cromogênicos) que fazem com que os microrganismos de interesse presentes na amostra produzam uma mudança de cor (ou fluorescência) no sistema inoculado (MORAIS, 2010). À medida que os coliformes se reproduzem no Colilert[®], eles utilizam β -galactosidase para metabolizar o indicador de

nutriente ONPG e alterá-lo de incolor para amarelo. A *E. coli* utiliza β -glucuronidase para metabolizar MUG e criar fluorescência. Já que a maioria dos não coliformes não conta com estas enzimas, eles não podem se reproduzir e interferir. Os poucos não coliformes que têm estas enzimas são seletivamente suprimidos pela matriz especificamente formulada do Colilert®. Esta abordagem diminui a incidência de falso-positivos e falso-negativos.

Ambos os lodos aeróbio e anaeróbio, foram submetidos à análise de patógenos. Após as diluições necessárias, receberam o meio Colilert® e foram colocados em cartelas Quanti-Tray/2000™. Posteriormente, as cartelas foram seladas e incubadas a uma temperatura de 35°C por 24 horas.

Após o tempo de detenção hidráulica total de 35 dias no reator, executou-se novamente o teste de patógenos com o kit Colilert® para o lodo anaeróbio (que foi submetido ao tratamento).

4.2.4 Arranjo do sistema e monitoramento do processo

Para a adaptação do modelo teórico em escala de bancada buscou-se adequar principalmente as condições de temperatura, mistura e tempo de detenção hidráulica, de modo que elas fossem as mais semelhantes possíveis da configuração teórica proposta. Para tal, foi realizado o seguinte procedimento experimental:

- I. Uma placa aquecedora e agitadora (IKA C-MAG HS7) foi adquirida exclusivamente para a execução dos ensaios, a qual pode permanecer em funcionamento por extensas durações de tempo mantendo a agitação constante e temperatura com variação máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$.
- II. Para a mensuração da quantidade de biogás produzido durante a digestão anaeróbia utilizou-se um medidor de gás Ritter, que indica a quantidade de gás total produzida em determinado período. Dessa forma, estabeleceu-se o período de um dia como unidade mínima e realizou-se o monitoramento do medidor diariamente. O medidor de gás Ritter possui um procedimento de preparação que deve ser realizado previamente à utilização do mesmo. A principal etapa da preparação consiste no preenchimento interno do medidor com o polímero líquido fornecido pelo fabricante. Inicialmente, o medidor de gás foi conectado diretamente ao Kitassato (reator) por meio de mangueiras de silicone e o sistema foi posto em funcionamento. Porém, criou-se sem intenção um efeito sifão, que impulsionou o líquido para fora do medidor. O líquido adentrou ao reator e conseqüentemente entrou contato com o lodo, deteriorando todo o sistema. Devido a este problema foi necessária a instalação de um selo hídrico entre os

dois equipamentos (medidor e placa) de modo a aumentar a perda de carga e impedir que o polímero líquido saísse do medidor através do efeito sifão e adentrasse indevidamente ao reator. Além disso, o selo hídrico previne a entrada acidental de lodo (que eventualmente pudesse sair do reator) ao medidor de gás.

- III. Arranjou-se o sistema da seguinte forma: a placa aquecedora e agitadora foi acoplada ao medidor de gás e entre os dois equipamentos instalou-se o selo hídrico. Todas as extremidades de equipamentos e conexões foram vedadas com silicone transparente, garantindo o ambiente anaeróbio.
- IV. O reator teórico proposto pelo modelo tem forma ovalada, “egg shaped”, porém devido às dificuldades de adaptação de uma vidraria nesse formato, utilizou-se um Kitassato de 500 ml para simular o reator. Com o sistema previamente arranjado, adicionou-se 350 ml de lodo de esgoto anaeróbio ao Kitassato. Idealmente o volume de lodo teria de ser maior, porém devido às limitações de vidraria, foi definido o volume de 350 ml, para evitar riscos de vazamento e facilitar a agitação, garantindo que o material permanecesse o mais homogêneo possível durante a digestão. A placa permaneceu ligada por 25 dias a 35°C com agitação constante para realização da digestão mesofílica e posteriormente 10 dias a 55°C para a realização da digestão termofílica, também com agitação constante. Diariamente, foi verificado o funcionamento do sistema e registrada a quantidade de gás produzido. A Figura 3 ilustra o sistema de operação. A Figura 4 mostra os detalhes da vedação nas extremidades e conexões.

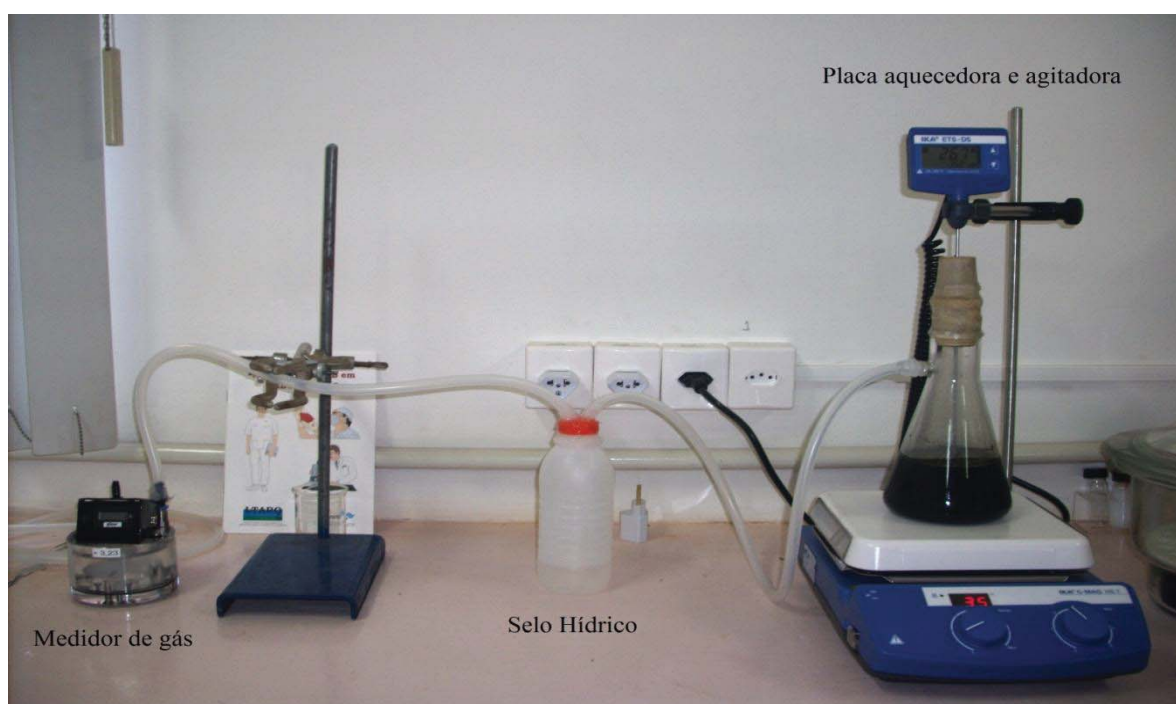


Figura 3. Sistema de digestão anaeróbia em operação.

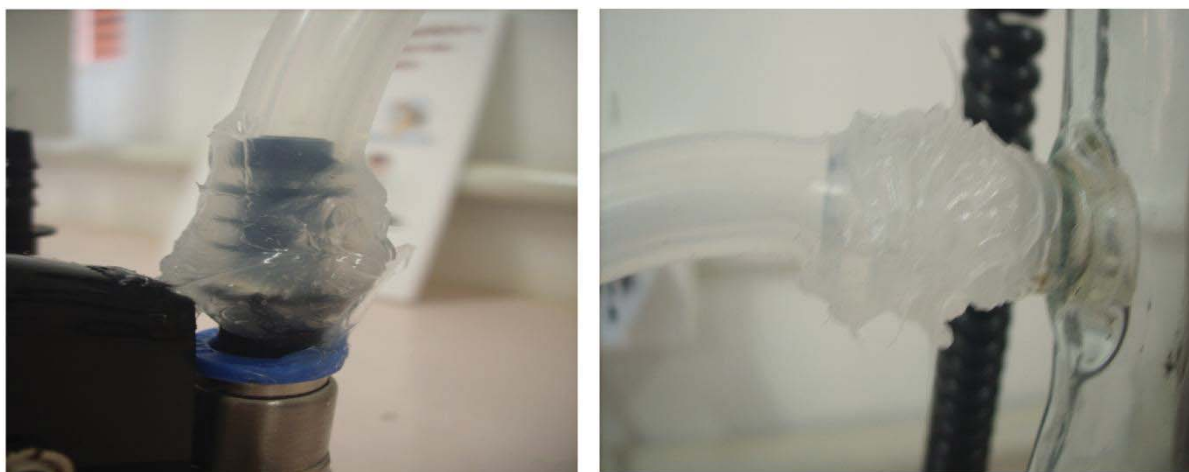


Figura 4. A vedação de todas as extremidades é demasiadamente importante na medida em que garante o ambiente anaeróbio, impedindo a entrada de oxigênio.

- V. Como mencionado nos itens 4.2.2 e 4.2.3 após o processo de digestão anaeróbia do lodo, foram executadas as determinações de sólidos fixos e voláteis e quantificação de patógenos para o lodo tratado. Por meio da interpretação dos resultados avaliou-se o desempenho da configuração teórica de reator anaeróbio proposta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados está estruturada de modo a apresentar inicialmente o modelo teórico de reator anaeróbio obtido através do levantamento bibliográfico entre livros e periódicos acerca de processos de tratamento e estabilização de lodos de esgoto e reatores anaeróbios e, posteriormente, apresentam-se os resultados dos ensaios laboratoriais, bem como a interpretação dos mesmos, que visaram testar a eficiência da configuração teórica proposta em termos de estabilização do lodo, eliminação dos patógenos e redução volumétrica.

Os trabalhos consultados nesta pesquisa não contemplavam, de forma holística, todas as vertentes apresentadas neste projeto. São elas a estabilização da matéria orgânica presente no lodo, a eliminação de patógenos, a redução de volume e o reaproveitamento energético. Os trabalhos consultados mostram análises aprofundadas para determinado tema, entre eles inativação de patógenos, otimização da produção de metano, efeito da configuração dos reatores no processo de digestão, etc.

5.1 Considerações e parâmetros avaliados para o desenvolvimento do modelo

Apresenta-se a seguir primeiramente os fatores que determinam e influenciam a operacionalidade do modelo e, posteriormente, a configuração de reatores obtida e suas particularidades.

5.1.1 Tipo do reator

Os reatores anaeróbios utilizados para o tratamento e estabilização da matéria orgânica presente no lodo de esgoto pode apresentar estruturas convencionais, na maioria dos casos, cilíndricas ou com base retangular, sendo essas bases amplas e com paredes perpendiculares a base (Figura 5). Porém, a estrutura escolhida para o modelo foi a “ovalada”, estrutura estudada e descrita em diversos artigos como *egg shaped* (Figura 5).

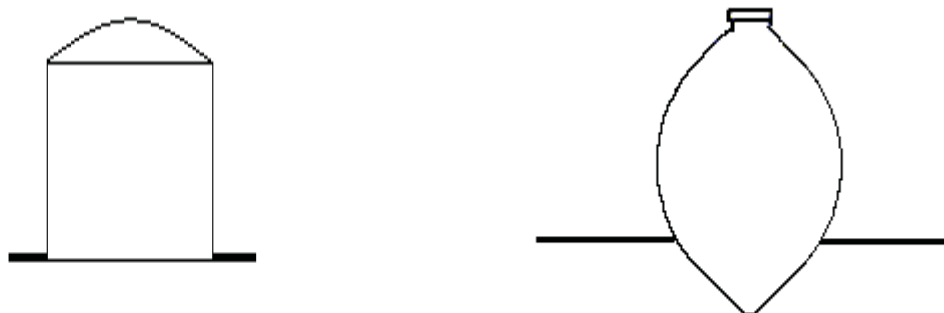


Figura 5. O primeiro modelo é um exemplo de estrutura cilíndrica convencional de reator, enquanto o segundo apresenta estrutura *egg shaped*. Os dispositivos internos foram omitidos.

Os modelos convencionais apresentam custos inferiores para construção, porém possuem inconvenientes como formação de depósitos de sólidos na base do reator e “zonas mortas” de degradação, devido a dificuldade da implantação de um sistema de mistura eficiente para esta configuração de reator, resultando em um substrato não suficientemente homogêneo. Além disso, por possuírem a base mais larga, demandam maior área.

Os modelos *egg shaped*, embora sejam mais onerosos para construção, apresentam eficiência hidráulica superior, possibilitando maior superfície de contato entre o lodo e os microrganismos decompositores devido à mistura que pode ser promovida por meio de tubos de propulsão instalados no interior do reator que garantem a homogeneidade do substrato, possibilitando que todo o tanque esteja disponível para tratamento (OLESZKIEWICZ & MAVINIC, 2002). Outras vantagens podem ser descritas, tais como menor formação de espuma e reduzida deposição de sólidos na base do reator (DICHTL, 1997).

5.1.2 Temperatura e tempo de detenção hidráulica

A temperatura afeta diretamente o processo de digestão anaeróbia, em particular, a atividade microbiológica. A maior parte dos reatores anaeróbios opera em temperatura mesofílica, variando entre 30 e 38°C. Entretanto, estes podem operar também em temperaturas mais elevadas, entre 50 e 70°C, faixa adequada para bactérias termofílicas (APPELS *et al.*, 2008). A digestão termofílica é mais rápida que a mesofílica, uma vez que as taxas das reações bioquímicas aumentam à medida que a temperatura se eleva. Outras vantagens deste tipo de digestão são a elevada redução de sólidos voláteis, aumento da desidratação do lodo e inativação de grande parte dos organismos patogênicos presentes no substrato (APPELS *et al.*, 2008). Song *et al.* (2004) aplicaram a digestão termofílica (55°C) com tempo de detenção hidráulica de 10 dias como tratamento para desinfecção do lodo obtendo 99.7% de eliminação de coliformes totais, resultado suficientemente satisfatório para justificar a utilização do reator termofílico para inativação de patógenos no modelo criado. As desvantagens dizem respeito à maior quantidade de energia requerida para a manutenção do processo e menor estabilidade do mesmo, haja vista que bactérias termofílicas são mais sensíveis a flutuações de temperatura quando comparadas às bactérias mesofílicas (APPELS *et al.*, 2008).

Buscando aliar as vantagens e minimizar as desvantagens de cada processo, a configuração proposta apresenta reatores separados, conectados em série, sendo o primeiro operando na faixa mesofílica de temperatura (35°C) e com maior tempo de retenção hidráulica (25 dias). A digestão mesofílica é mais estável às variações do meio e apresenta maior eficiência na estabilização da matéria orgânica, além de requerer menos energia para operar. O segundo reator trabalha na faixa termofílica de temperatura (55°C) e apresenta menor tempo de retenção (10 dias), no intuito de prosseguir com a estabilização, mas

principalmente eliminar organismos patogênicos. O segundo reator apresenta menor volume, devido ao menor tempo de detenção hidráulica e o fluxo ser contínuo. O lodo será aquecido através dos trocadores de calor (tipo “jaqueta d’água”) que receberão água aquecida proveniente dos dois boilers alimentados pelo biogás gerado na digestão anaeróbia de ambos os reatores. A utilização de dois boilers é plausível, pois o sistema teórico é operado em regime contínuo e os reatores possuem temperaturas distintas, logo, os fluxos de água que alimentarão os trocadores de calor precisam também estar em temperaturas distintas.

Ambos os reatores são munidos de termostatos e sistemas reguladores de temperatura, pois é crucial a manutenção da temperatura constante para um processo de digestão eficiente (IGONI *et al.*, 2008).

5.1.3 Potencial Hidrogeniônico - pH

O valor do potencial hidrogeniônico e particularmente suas variações influenciam significativamente o processo de digestão do lodo, por esta razão a capacidade de tamponamento do substrato é muito importante. O desempenho dos reatores está intimamente ligado ao equilíbrio das fases acidogênica e metanogênica, uma vez que o excesso da produção de ácidos voláteis pode suprimir a capacidade tampão do meio diminuindo o pH a níveis inibidores ao crescimento de arqueias metanogênicas. O pH atua diretamente no crescimento microbiano e influencia todas as reações bioquímicas que ocorrem no processo de digestão anaeróbia. As bactérias envolvidas na digestão anaeróbia apresentam atividade em pH na faixa entre 6 e 8 sendo que valores próximos a neutralidade são considerados ótimos (IGONI *et al.*, 2008).

A alcalinidade deve se manter em aproximadamente 3000 mg/l, para que haja eficiência do tamponamento e garantia de alta taxa de geração de metano (IGONI *et al.*, 2008).

Dessa forma, estabelece-se o pH ideal para o lodo em ambos os reatores do modelo devem ser próximos de 7. Caso o valor do potencial hidrogeniônico do lodo não se encontre próximo a neutralidade, será necessário realizar a correção do pH do mesmo. Não foi encontrado nenhum caso durante o levantamento bibliográfico que descrevesse lodos com pH excessivamente alcalinos antes ou durante o processo de digestão que demandassem correção. Porém, é relativamente comum lodos apresentarem valores baixos de pH (<5) devido a alta

concentração de ácidos voláteis. Para contornar o problema, pode-se adicionar bicarbonato até que se atinja a neutralidade (PLACHÁ *et al.*, 2008).

5.1.4 Metais pesados e potenciais inibidores do processo de digestão anaeróbia

Efluentes industriais são a principal fonte de metais pesados presentes no esgoto sanitário e consequentemente no lodo de esgoto, contribuindo com mais de 50% do conteúdo total de metais (APPELS *et al.*, 2008), sendo os mais comumente encontrados no lodo: cromo, cobre, níquel, cádmio e zinco (UYSAL *et al.*, 2010). Muitas enzimas e coenzimas dependem de concentrações mínimas (traços) de certos metais para manter suas atividades. Porém, em determinadas concentrações, os metais são inibidores ou tóxicos aos microrganismos, afetando negativamente o processo de digestão anaeróbia. A Tabela 4 mostra as concentrações críticas de alguns metais pesados.

Tabela 4. Concentrações inibitórias dos principais metais pesados encontrados no lodo de esgoto. Adaptado de Appels *et al.* (2008)

Substância	Concentração inibitória (mg/l)
Cr ³⁺	2.0 (solubilizado) ou 180-240 (total)
Cr ⁶⁺	3.0 (solubilizado) ou 200-250 (total)
Ni ²⁺	3.0 (total)
Zn ²⁺	1.0 (solubilizado)
Cu ²⁺	0.5 (solubilizado) ou 50-70 (total)

Segundo Silva (2007), em pH neutro ou alcalino, os elementos metálicos como cobre, níquel, zinco e outros metais pesados encontram-se indisponíveis para o meio, ou seja, estão presentes em forma complexadas (e podem estar na forma insolúvel), não acarretando problemas em termos de inibição do processo anaeróbio, exceto se em concentrações excessivamente elevadas. Portanto, se o lodo apresentar concentrações metálicas suficientes para causar inibição da atividade microbiológica (Tabela 4), pode-se precipitar esses metais através da adição de substâncias alcalinas com a finalidade de elevar o pH. Ainda de acordo com Silva (2007) também é possível realizar a precipitação dos metais pesados através da adição de sulfetos. A reatividade dos metais com os sulfetos pode ser utilizada como

estratégia no controle na concentração desses elementos. Porém, o efeito pode ser contrário caso haja um excesso na concentração de sulfeto solúvel, que também é tóxico em altas concentrações. Em geral, podem ser toleradas concentrações de até 200 mg/l. No entanto, é fundamental que se faça o controle do lançamento de metais pesados no esgoto sanitário diretamente na fonte, pois apenas medidas paliativas são possíveis após a contaminação por este tipo de substância.

Sulfatos também podem ser problemáticos para o processo de digestão anaeróbia se presentes em concentrações acima de 500 mg/l, pois são reduzidos a sulfeto pela ação bacteriana e posteriormente sulfeto de hidrogênio pode ser formado, que além de tóxico, causa redução da proporção do metano no biogás com aumento da concentração de gás sulfídrico, implicando entre outros fatores na diminuição da qualidade energética do biogás (GRAY, 2005).

Outro inibidor relativamente comum em sistemas anaeróbios são os nitratos devido à desnitrificação uma vez que esta pode ocorrer dentro do reator provocando uma mudança no potencial redox, ocasionando a supressão da produção de metano. Por esta razão é importante garantir que a desnitrificação ocorra antes do lodo adentrar ao reator (GRAY, 2005).

5.1.5 Mistura e homogeneidade

Para que o processo de digestão anaeróbia seja eficiente, é imprescindível que se mantenha a homogeneidade do substrato, garantindo que haja uma boa disponibilidade de contato entre o material orgânico e os microrganismos presentes no lodo (SONG *et al.*, 2004). Portanto, é fundamental que o sistema de mistura seja eficiente.

No reator proposto a mistura será realizada mecanicamente por pás que impulsionarão o lodo através de um tubo, sistema descrito na literatura como tudo de propulsão (GRAY, 2005). Este sistema assegura que todo o tanque esteja disponível para tratamento e aliado a estrutura *egg shaped* do reator garante que pouco ou nenhum depósito de sólidos ocorra na base do reator. Um motor impulsionará as pás do tubo de propulsão.

Ainda não foi determinado o combustível que alimentará o motor, bem como a potência do mesmo. É possível que uma fração do biogás seja utilizada para geração de energia elétrica ou mecânica, porém, por se tratarem de cálculos específicos e complexos, estes serão realizados somente na etapa de dimensionamento dos reatores, quando todos os dados experimentais estiverem disponíveis.

Apenas para efeito de indicar um procedimento básico para o cálculo da potência requerida pelo sistema de mistura, tem-se o último parágrafo da subseção 5.1.6 *Reaproveitamento energético*.

5.1.6 *Reaproveitamento energético*

O biogás produzido no processo de digestão anaeróbia do lodo será utilizado no boiler para gerar calor e aquecer a água presente em seu interior. Como indicado anteriormente (Ver Tabela 2), o biogás é composto majoritariamente por metano, um gás que apresenta alto potencial energético, mas também por quantidades moderadas de dióxido de carbono e quantidades reduzidas de gás sulfídrico. Os dois últimos gases reduzem significativamente o poder energético do biogás e por esta razão é recomendável removê-los da mistura.

Um método eficiente para executar a remoção simultânea do dióxido de carbono e gás sulfídrico do biogás é a lavagem contra corrente utilizando água como solvente, haja vista que CO_2 e H_2S são moléculas polares e CH_4 apolar não é solúvel em água, com o biogás comprimido entre 5 e 7 bar (APPELS *et al.*, 2008). A solubilidade dos gases em água aumenta de acordo com a elevação da pressão e se reduz com o aumento da temperatura.

O acúmulo de enxofre na água da lavagem de gases pode causar problemas de corrosão. Pode-se solucionar estes problemas mediante utilização de solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para a remoção dos gases, tendo como produtos os compostos insolúveis CaCO_3 e CaS (APPELS *et al.*, 2008).

Estudos aprofundados em termos de dimensionamento e avaliação da auto suficiência do reator, bem como os possíveis déficits de energia que deverão ser supridos serão realizados no segundo ano de pesquisa. Porém, apenas no intuito de apresentar uma visão global do dimensionamento energético, a seguir serão apresentados alguns dados, fórmulas e informações relevantes obtidos na literatura.

A Tabela 5 apresenta as principais características do lodo secundário de acordo com Andreoli *et al.* (2001).

Tabela 5. Lista de algumas propriedades do lodo de esgoto secundário pertinentes ao cálculo para estimar a geração de metano. Adaptado de Andreoli *et al.* (2001)

Propriedade	Valor
Massa específica (kg/m ³)	1005-1030
Teor de sólidos secos (%)	2-7
Calor específico (J/Kg.°C)	4200
Relação SV/ST	0,65-0,8

A relação SV/ST do lodo secundário (lodo que será utilizado nos reatores) varia entre 0,65 a 0,8 (ANDREOLI *et al.*, 2001). Esta relação permite a obtenção da fração biodegradável e potencialmente geradora de metano do lodo. Por exemplo, se 1000 kg de lodo secundário adentrar ao reator e adotando a relação SV/ST do lodo afluente como 0,7, temos 700 kg de sólidos voláteis passíveis de degradação e geração de metano. A porcentagem de destruição de SV é variável e depende do tempo de detenção hidráulica. Tomando hipoteticamente o valor de 40% de degradação e sabendo que a produção de biogás em digestores anaeróbios varia entre 0,8 e 1,1 m³/kg de SV destruído (ANDREOLI *et al.*, 2001) é possível estimar a quantidade de gás gerada, neste caso igual a 224 m³ de biogás, considerando o menor rendimento 0,8 m³/kg de SV destruído.

Demonstrou-se acima como estimar a quantidade de biogás gerado através do processo anaeróbio. A partir do metano, pretende-se produzir calor e possivelmente energia elétrica e mecânica para operar os reatores. Como descrito anteriormente, é recomendável que se faça o enriquecimento do biogás, no intuito de aumentar a proporção do metano na mistura antes da queima, porém sabe-se que esta é uma operação que dificilmente será executada na prática e, portanto, serão utilizados os dados e propriedades do biogás original (sem tratamento) para efetuar as estimativas. A Tabela 6 ilustra as principais propriedades do biogás de acordo com Appels *et al.* (2008).

Tabela 6. Propriedades do biogás. Adaptado de Appels *et al.* (2008).

Propriedade	Valor
Valor calorífico do biogás (MJ/m ³)	23,3
Energia gerada (kWh/m ³)	6,5
Produção de biogás (m ³ /kg SV destruído)	0,8-1,1

A quantidade de energia necessária para manter a temperatura desejada no interior do reator é obtida através da soma da quantidade de calor necessária para aquecer o lodo bruto com a quantidade de calor necessária para compensar as perdas de calor por meio das paredes do reator (ANDREOLI *et al.*, 2001). Dessa forma:

$$Q = M_f \times C_p \times \Delta T_1 + U \times A \times \Delta T_2 \times 86,4 \quad (1)$$

Onde:

Q = demanda diária de energia do digestor (kJ/d)

M_f = massa de lodo bruto alimentado ao digestor (kg/d)

C_p = calor específico do lodo (kJ/kg.°C)

ΔT_1 = diferença entre a temperatura do lodo afluyente e a do digestor (°C)

U = coeficiente de transferência de calor (J/s.m².°C)

A = área da superfície externa do digestor (m²)

ΔT_2 = diferença entre a temperatura interna do digestor e a temperatura ambiente externa (°C)

Uma vez estimada a quantidade de energia necessária diariamente para aquecer o digestor, é possível calcular a quantidade de biogás que deve ser gerado e posteriormente comburido para suprir tal necessidade.

Para a realização dos cálculos deve-se considerar que o biogás forma uma mistura combustível com o ar quando atinge concentrações entre 5 – 15 % de metano. Concentrações de metano inferiores a 5% na mistura não são suficientes para que ocorra a ignição, enquanto que concentrações acima de 15% apresentam insuficiência de oxigênio para manter a combustão (ANDREOLI *et al.*, 2001). Outros fatores, como as perdas de calor através das tubulações, rendimento do boiler e dos trocadores de calor também serão avaliados detalhadamente durante a fase de dimensionamento dos reatores.

O modelo proposto apresenta sistemas mecânicos (tubos de propulsão) para a realização da mistura e homogeneização do substrato. A potência requerida por sistemas mecânicos de mistura em reatores anaeróbios varia em virtude do sistema escolhido e do volume do reator (APPELS *et al.*, 2008). A partir desses valores requeridos e análise de todas as variáveis envolvidas, como rendimento, tempo de funcionamento, combustíveis a serem

utilizados, pode-se estimar a potência do motor que fará a mistura do substrato, bem como a avaliar qual proporção da demanda energética poderá ser suprida com o uso do biogás.

5.1.7 Redução volumétrica do lodo

O primeiro passo a ser realizado na finalidade de reduzir o volume do lodo de acordo com o modelo proposto é o adensamento do mesmo mediado pelo efeito da gravidade. Por meio deste adensamento é possível reduzir o lodo a um terço do volume inicial (APPELS *et al.*, 2008) e o líquido sobrenadante deve retornar para o tratamento de águas residuárias convencional na ETE. Após a etapa de adensamento ser cumprida, o lodo pode ser direcionado para o primeiro reator, local onde ocorrerá a digestão anaeróbia mesofílica. Após ser cumprido o tempo de detenção hidráulica de 25 dias no reator mesofílico o lodo segue em direção ao segundo reator, onde será submetido à digestão termofílica.

A etapa termofílica da digestão, além de eliminar mais de 95% dos patógenos (SONG *et al.*, 2004) garante também a redução do volume do lodo em decorrência dentre outros fatores da evaporação da água e da degradação de sólidos voláteis que são convertidos em biogás. Porém, para a desidratação definitiva do lodo e obtenção da máxima redução volumétrica é necessário que se realize operações ao final do processo com o lodo previamente estabilizado e higienizado.

5.2 Apresentação do modelo

O modelo do reator anaeróbio desenvolvido é representado pela Figura 6. Têm-se inicialmente um compartimento destinado ao adensamento do lodo ligado a dois reatores conectados em série. Entre os reatores tem-se o reservatório de biogás que será fonte energética para os boilers onde a água será aquecida para utilização nos trocadores de calor do tipo “jaqueta d’água” que envolvem ambos os reatores em um sistema fechado. A água sai aquecida do boiler e retorna resfriada após a troca energética com os reatores. Uma bomba é instalada entre os dois reatores, no intuito de realizar a transferência do lodo do primeiro para o segundo reator. Além disso, são instalados equipamentos para o monitoramento do processo de digestão anaeróbia, como sensores de pH, medidor de gás e termostatos. O modelo segue todos os parâmetros como temperatura, tempo de detenção hidráulica, pH e outros de acordo

com o descrito ao longo da seção 5.1 *Considerações e parâmetros avaliados para o desenvolvimento do modelo*. Um esquema de leito de secagem proposto por Franci (1999) é representado pela Figura 7. Alguns dos maiores inconvenientes dos leitos são a exalação de mau cheiro e atração de vetores, porém como o lodo que será encaminhado aos leitos de secagem estará previamente digerido, esses problemas serão amplamente minimizados.

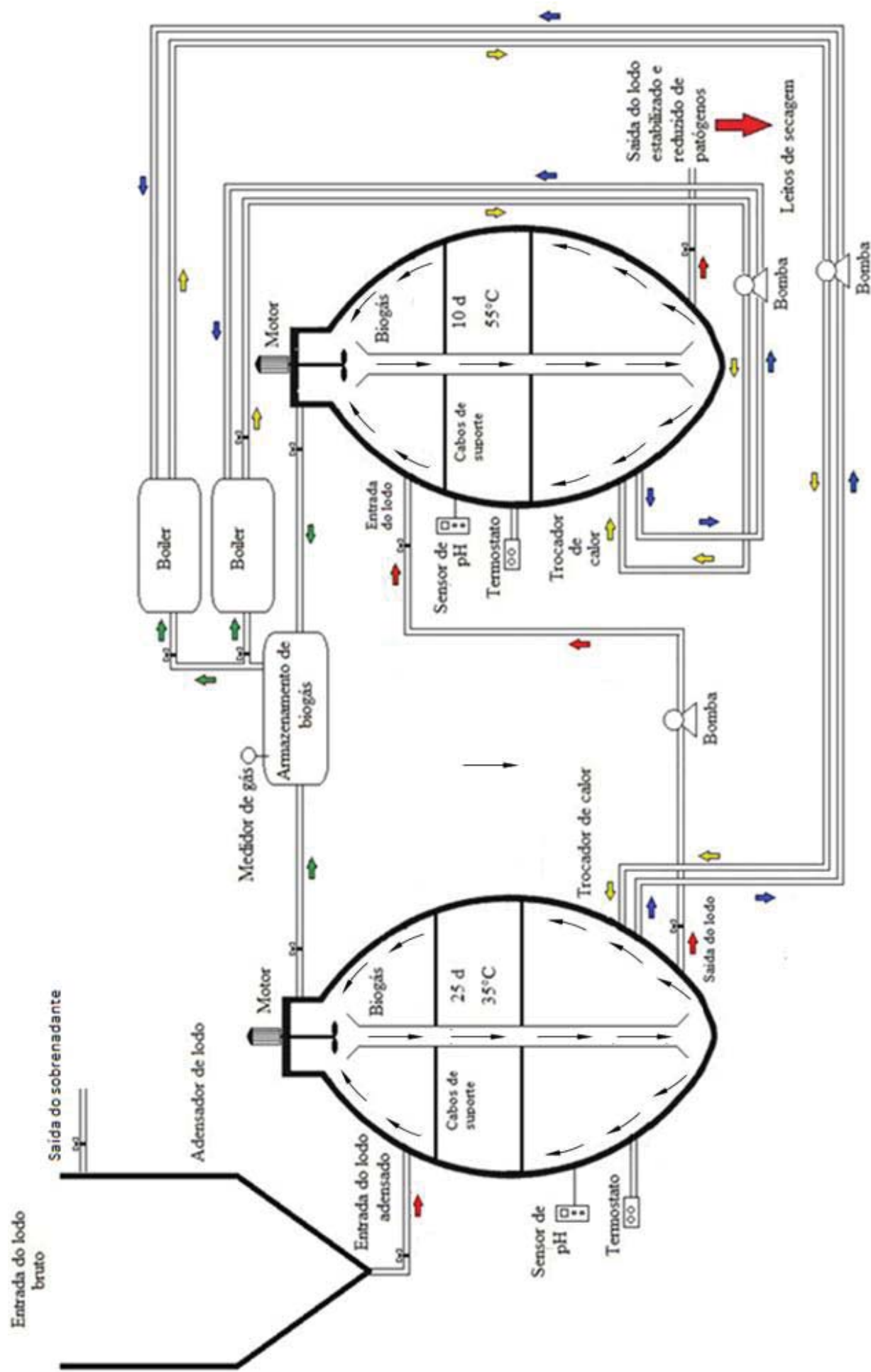


Figura 6. Representação da configuração de reatores anaeróbios *egg shaped* em série obtida com as indicações dos fluxos de lodo, água e biogás. (Vermelho= lodo, Verde= biogás, Amarelo= água aquecida, Azul= água resfriada)

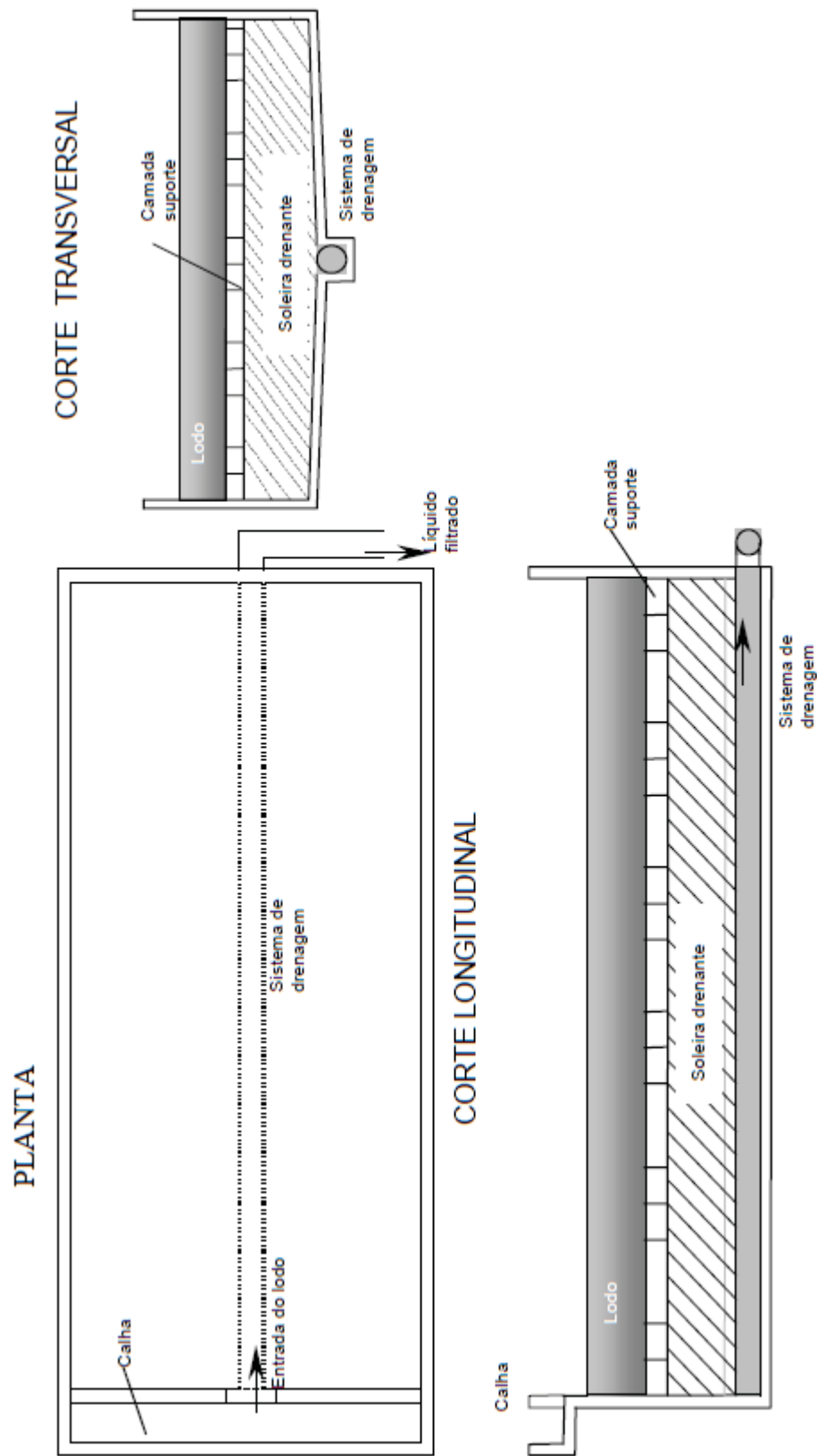


Figura 7. Esquema de um leito de secagem (Fonte: Franci, 1999)

5.3 Ensaios Laboratoriais

Inicialmente executou-se a caracterização de ambos os lodos, aeróbio e anaeróbio, em termos de ST, SV e SF e quantificação de patógenos. Foi realizado o tratamento do lodo anaeróbio e o parâmetro para definição deste foi a maior proporção de matéria orgânica de acordo com os valores obtidos de ST, SV e SF descritos na seção subsequente.

5.3.1 Determinação de sólidos pelo método gravimétrico

Foi realizada a determinação de ST, SV e SF de acordo com a metodologia descrita em 4.1.2 *Determinação de sólidos pelo método gravimétrico*. Os testes foram feitos em triplicatas antes e em duplicata após o processo de digestão anaeróbia. Os resultados para os lodos aeróbio e anaeróbio antes do tratamento são apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Resultado da determinação de ST, SV e SF para os lodos aeróbio e anaeróbio. As cápsulas 1,2,3 continham lodo anaeróbio e as cápsulas 4,5,6 continham lodo aeróbio.

N° da cápsula	Massa das cápsulas secas (g)	Massa do lodo (g)	Massa da cápsula+lodo após estufa (g)	Massa cápsula+lodo após calcinação (g)	Sólidos Totais (g)	Sólidos fixos (g)	Sólidos Voláteis (g)	SV/ST
1	63,8670	30,7229	65,6683	64,7106	1,8013	0,8436	0,9577	0,53
2	66,3871	30,174	68,1796	67,2459	1,7925	0,8588	0,9337	0,52
3	66,2300	30,5228	68,1345	67,1037	1,9045	0,8737	1,0308	0,54
4	67,1858	30,3382	71,2864	69,9092	4,1006	2,7234	1,3772	0,34
5	70,6499	30,8106	74,7585	73,3698	4,1086	2,7199	1,3887	0,34
6	64,3701	30,2243	68,5713	67,0586	4,2012	2,6885	1,5127	0,36

A concentração de sólidos totais obtida para o lodo anaeróbio foi de 61,26 g/l e para o lodo aeróbio de 138 g/l. Observa-se uma baixa relação na relação SV/ST para ambos os lodos, porém para o lodo aeróbio os valores obtidos foram excessivamente reduzidos, demonstrando alguma anomalia do material. Como o experimento foi realizado em triplicata, a chance de erro experimental foi praticamente descartada. A explicação mais provável para os baixos valores encontrados é a forma como o lodo foi coletado na ETE. Como a lagoa de aeração possui concreto em sua base, é possível que pequenos pedaços de sedimentos do fundo foram

coletados juntamente com o lodo, uma vez que a coleta foi executada diretamente com uma pá. Os pequenos sedimentos provavelmente contribuíram para aumentar significativamente a porção inorgânica do lodo (observa-se alta proporção de sólidos fixos), dessa forma reduzindo a relação SV/ST. Como o resultado para o lodo aeróbio não se mostrou confiável no que diz respeito à quantidade de matéria orgânica presente no mesmo, optou-se por realizar o tratamento do lodo anaeróbio, apesar de sua relação SV/ST também não ser a ideal.

A tabela 8 apresenta os resultados da análise de ST, SV e SF para o lodo anaeróbio após o tratamento mesofílico e termofílico anaeróbio.

Tabela 8. Resultado da determinação de ST, SV e SF do lodo anaeróbio pós tratamento.

N° da cápsula	Massa das cápsulas secas (g)	Massa do lodo (g)	Massa da cápsula+lodo após estufa (g)	Massa cápsula+lodo após calcinação (g)	Sólidos Totais (g)	Sólidos fixos (g)	Sólidos Voláteis (g)	SV/ST
1	66,38	30,2957	68,0134	67,1534	1,6334	0,7734	0,86	0,52
2	70,76	30,1480	72,1955	71,4639	1,4355	0,7039	0,7316	0,50

A concentração final de sólidos totais para o lodo anaeróbio tratado foi de 51,74 g/l. Observa-se que a redução na relação SV/ST foi praticamente nula, dessa forma é possível concluir que o lodo anaeróbio da lagoa de sedimentação da ETE de Araraquara encontrava-se praticamente estabilizado antes do tratamento.

5.3.2 Análise de patógenos

Como descrito no item 4.1.3 *Análise de Patógenos*, a técnica utilizada para determinação de patógenos foi o Colilert®. Este método foi desenvolvido para a determinação de coliformes e patógenos em amostras de água, uma vez que a detecção só é possível em amostras transparentes. Dessa forma, o lodo de esgoto foi diluído em água deionizada até atingir a condição de transparência. Antes do tratamento, realizou-se a diluição de 10⁵ vezes das amostras de lodo aeróbio e anaeróbio. A diluição mostrou-se adequada e os resultados obtidos antes do tratamento são apresentados na tabela 9.

Tabela 9. Valores para coliformes totais e *E. coli* obtidos antes do tratamento.

	Lodo Aeróbio	Lodo Anaeróbio
Coliformes Totais (NMP/100ml lodo)	$26,5 \times 10^5$	$14,5 \times 10^5$
<i>E. coli</i> (NMP/100ml lodo)	$9,5 \times 10^5$	$3,1 \times 10^5$

Apenas o lodo anaeróbio sofreu o processo de digestão anaeróbia e tratamento termofílico para eliminação dos patógenos. Dessa forma, após o tratamento executou-se a análise de patógenos apenas para o lodo anaeróbio. De acordo com a descrição do método Colilert[®] acima, as amostras devem ser transparentes para a verificação. Apenas na diluição de 10^3 vezes essa condição foi alcançada. Os resultados obtidos para a diluição de 10^3 foram nulos, ou seja, a quantidade de coliformes totais ou *E. coli* é no máximo ou inferior a 10^3 NMP/100 ml de lodo de esgoto. Por meio deste resultado é possível assegurar que a digestão termofílica do lodo demonstrou-se ser um método bastante eficiente e reduziu a quantidade de patógenos em pelo menos 99,7%, valor este semelhante ao encontrado na literatura. Segundo Song *et. al.* (2004) a digestão termofílica nos moldes como foi realizada por este projeto é capaz de eliminar 99,7% dos organismos patogênicos.

5.3.3 Potencial Hidrogeniônico

O potencial hidrogeniônico do lodo anaeróbio foi medido antes e após o processo de digestão anaeróbia com auxílio de um pHmetro digital. Os valores obtidos encontram-se na tabela 10.

Tabela 10. Valores de pH para o lodo anaeróbio antes e após o tratamento.

Lodo anaeróbio	pH
Bruto	6,5
Digerido	7,4

Como antes do tratamento o lodo apresentava um valor de pH próximo a neutralidade, optou-se por iniciar processo de digestão sem qualquer medida para correção do pH. Após o tratamento, o pH mostrou-se mais elevado devido à menor concentração de ácidos voláteis presente no lodo.

5.3.4 Produção de gás

A produção de gás foi mensurada através das medições do fluxo do mesmo gerado durante a etapa mesofílica e termofílica da digestão anaeróbia. A figura 6 ilustra a produção de biogás acumulado em função do tempo em dias de tratamento do lodo.

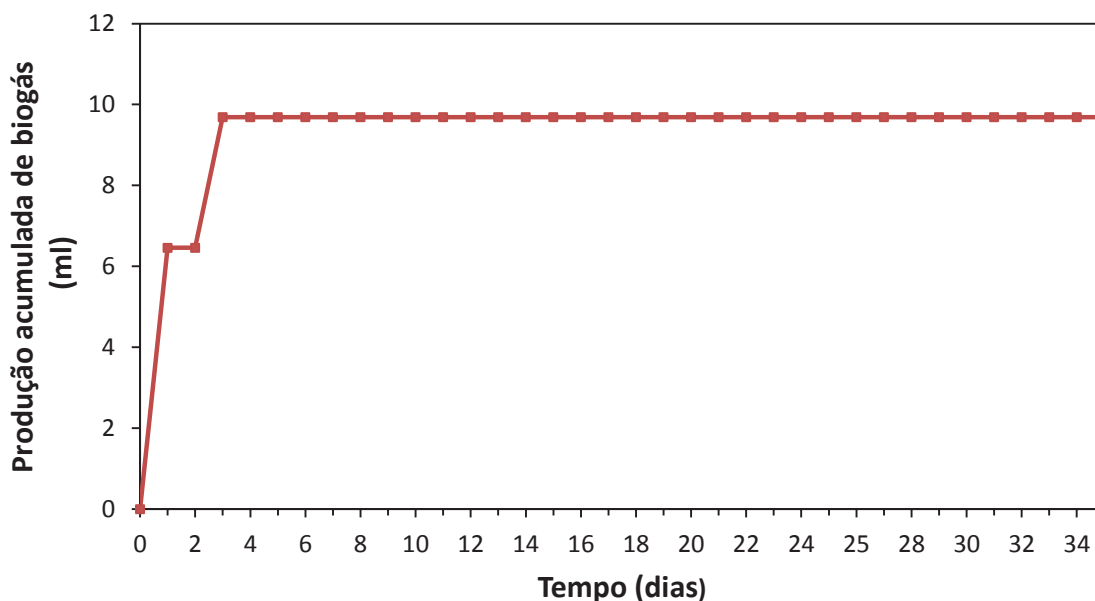


Figura 8. Produção de gás acumulada (ml) em função do tempo (dias).

De acordo com o que se esperava houve produção de gás somente na etapa mesofílica da digestão anaeróbia. A baixa produção de gás pode ser explicada pela reduzida quantidade de lodo adicionado ao reator (350 ml) e pela baixa relação SV/ST do mesmo, denotando que o material encontrava-se praticamente estabilizado antes do processo de digestão anaeróbia.

5.3.5 Redução volumétrica

Em relação à redução volumétrica do material, observou-se que a contribuição da digestão mesofílica convertendo sólidos em ácidos voláteis (e ultimamente a gases) e da digestão termofílica na evaporação de água foram insignificantes. O volume inicial de lodo disposto para tratamento foi de 350 ml. O volume final após os 35 dias de retenção hidráulica

foi de 341 ml. Dessa forma, ressalta-se a importância da última operação do modelo teórico proposto, o leito de secagem, que garantirá a máxima redução volumétrica do material, facilitando o transporte e a disposição final do mesmo.

6. CONCLUSÕES

Através do levantamento bibliográfico aliado ao conhecimento adquirido nas disciplinas da graduação, foi possível desenvolver a configuração de reatores em série que contemplasse os quesitos almejados pelo projeto, são eles a estabilização da matéria orgânica presente no lodo e a eliminação de organismos patogênicos. Quanto a redução volumétrica, esta será realizada por meio de leitos de secagem segundo o modelo, porém não foi testada em escala de laboratório. A inovação do modelo diz respeito à conformação dos reatores que foi proposta, sendo o primeiro mesofílico atuando basicamente na estabilização do lodo e geração de biogás, enquanto o segundo, termofílico, trabalha principalmente as questões de redução volumétrica e eliminação dos patógenos, além da proposta de reaproveitamento energético para geração de calor e eventualmente energia elétrica e mecânica, ambas sujeitas aos balanços energéticos que serão calculados no decorrer da pesquisa.

Os ensaios laboratoriais permitiram comprovar efetivamente a eficiência do modelo proposto apenas para remoção de patógenos, uma vez que se atingiu ao menos 99,7% de redução. Registrou-se também produção de gás, porém a quantidade produzida foi baixa e não foi executada a caracterização do mesmo, impossibilitando a comprovação de que houve produção de metano. Em relação à estabilização do lodo, a redução da relação SV/ST do lodo foi praticamente nula, evidenciando que o lodo anaeróbio da ETE de Araraquara encontra-se praticamente estabilizado, tornando o tratamento mesofílico desnecessário. Quanto à redução volumétrica, a digestão termofílica demonstrou-se ser um método pouco eficiente justificando a utilização de leitos de secagem como última operação, garantindo um produto final de fácil transporte e manejo.

7. RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista os resultados obtidos nas análises de sólidos antes e após o tratamento do lodo anaeróbio, conclui-se que o mesmo encontrava-se em estágio avançado de estabilização. Dessa forma, sugere-se que o mesmo tratamento seja realizado para o lodo aeróbio, uma vez que provavelmente o estágio de estabilização deste não é tão avançado quanto o anaeróbio. Além disso, ressalta-se que o método de coleta do lodo na ETE deve ser aprimorado, pois é provável que a coleta direta como foi realizada neste trabalho tenha influenciado todos os ensaios de sólidos pelo método gravimétrico executados durante a pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 483 p., 2001.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21st. Edition. Washington D.C., 2005. 1600 p.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRE`VE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, 34, p.755-781, Elsevier, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10664. Determinação de sólidos pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989.

BEZERRA, F.B.; OLIVEIRA, M.A.C.L.; PEREZ, D.V.; ANDRADE, A.G.; MENEGUELLI, N.A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesq. agropec. bras.**, 41, n.3, p.469-476, mar. 2006

BOUGRIER, C.; ALBASI, C.; DELGN`ES, J.P.; CARR`ERE, H. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. **Chemical Engineering and Processing**, 45, p. 711-718, 2006.

BRASIL. Resolução Conama nº375/06, de 24 de agosto de 2006. Estabelece critérios e procedimentos para o uso, em áreas agrícolas, do lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, visando beneficiamentos à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n 167, 30 ago.2006, seção1, p. 141-146.

DICHTL, N., Thermophilic and mesophilic (two stage) anaerobic digestion, **Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management**, 11, p. 98–104, Wiley, 1997.

FRANCI, R. (coord). **Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas**. PROSAB, 80p. 1999.

GRAY, F.N. **Water Technology: An Introduction for Environmental Scientists and Engineers**. Butterworth-Heinemann, 600 p., 2005.

GUJER, W.; ZEHNDER, A.J.B. Conversion processes in anaerobic digestion. **Water Science and Technology**, 15, p. 127-167, 1983.

IGONI, A.H.; AYOTAMUNO, M.J.; EZE, C.L.; OGGAJI, S.O.T.; PROBERT, S.D. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, 85, p.430–438, Elsevier, 2008.

MCCARTY, P. L.; SMITH, D.P. Anaerobic wastewater treatment. **Environmental Science & Technology** 20(12), p.1200-1206, 1986.

MORAIS, E.B. **Indicadores microbiológicos, metais e índice de qualidade da água (IQA) associados ao uso e ocupação da terra para avaliação da qualidade ambiental da microbacia do rio Cabeça, na bacia do rio Corumbataí, SP.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, UNESP campus de Rio Claro, 2010.

NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26, p.505-519, 2002.

OLESZKIEWICZ, J.A.; MAVINIC, D.S. Wastewater biosolids: an overview of processing, treatment, and management. **Journal of Environmental Engineering and Science**, 1, p.75-88, Canada, n.1 fev.2002.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO; C.R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana de açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26, n.2, p. 505-519, 2002.

PARK, M.J.; JO, J.H.; PARK, D.; LEE, D.S. Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses. **International Journal of Hydrogen Energy**, 35, p.6194-6202, 2010.

PLACHA`A, I.; VENGLOSKY`B, J; MAKOVA`B, Z.; MARTINEZ`Z, J. The elimination of Salmonella typhimurium in sewage sludge by aerobic mesophilic stabilization and lime hydrated stabilization. **Bioresource Technology**, 99, p.4269-4274, 2008.

PROROT, A.; ESKICIOGLU, C.;DROSTE, R.; DAGOT, C.; LEPRAT, P. Assessment of Physiological State of Microorganisms in Activated Sludge with Flow Cytometry: Application for Monitoring Sludge Production Minimization. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, 35, p.1261–1268,2008.

ROCHA,M.T.; SHIROTA,R. Disposição final de lodo de esgoto. **Revista de estudos ambientais**, 1, n.3, 1999.

SILVA, F.G.C.S. **Modelização dinâmica do processo de digestão anaeróbia utilizando o modelo ADM1.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Aveiro, 2007.

SONG, Y.C.; KWON, S.; WOO, J. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. **Water Research**, 38, p.1653-1662, 2004.

STERRITT, R.M.; LESTER, J.N. **Microbiology for environmental and public health engineers.** London, E & F. N. Spon Ltd., 278 p., 1988.

TING,C.H.; D.J. LEE,D.J. Production of hydrogen and methane fromwastewater sludge using anaerobic fermentation. **International Journal of Hydrogen Energy**, 32, p.677– 682, Elsevier, 2007.

UYSAL, A.; YILMAZEL, D.Y.; DEMIRER, G.N. The determination of fertilizer quality of the formed struvite from effluent of a sewage sludge anaerobic digester. **Journal of Hazardous Materials**, 181, p. 248–254, 2010.

WANG, C.C.; CHANG, C.W.; CHU, C.P.; LEE, D.J.; B.-V. CHANG, B.V.; LIAO, C.S. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium Bifermentans*. **Journal of Biotechnology**, 102, p.83-92, 2003.

ZUPANCIC, G.D.; URANJEK, N.; ROS, M. *Full-scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge*. **Biomass and Bioenergy**, 32, p. 162-167, 2008