



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

***“CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO
E ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO LODO DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO DMAE-
UBERLÂNDIA-MG”***

Jader de Oliveira Silva

Uberlândia - MG
2011

JADER DE OLIVEIRA SILVA

***“CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO
E ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO DO LODO DA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO DMAE-
UBERLÂNDIA-MG”***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos Requisitos para a obtenção do título de MESTRE EM QUÍMICA.

Orientador: Prof. Dr. Guimes Rodrigues Filho

Uberlândia - MG
2011



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA



Ata da defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO junto ao Programa de Pós-Graduação em Química, do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia
DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO, NÚMERO 132/COPGQ.

DATA: 28/11/2011

DISCENTE: Jader de Oliveira Silva

MATRÍCULA: 10922QMI008

TÍTULO DO TRABALHO: Caracterização do potencial energético e estudo do comportamento térmico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE – Uberlândia-MG.

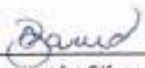
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Química

LINHA DE PESQUISA: Físico-Química de Macromoléculas e Colóides


PROJETO DE PESQUISA DE VINCULAÇÃO: Reciclagem de resíduos poliméricos industriais e urbanos

Às nove horas do dia vinte e oito de novembro do ano dois mil e onze, na sala 200 do Bloco 50-A, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Doutores: Hernane da Silva Barud, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, de Araraquara/SP; Rodrigo Alejandro Abarza Muñoz, do IQUFU e Guimes Rodrigues Filho, professor orientador e presidente da mesa. Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa apresentou o candidato e a Banca Examinadora, agradeceu a presença do público e discorreu sobre as normas e critérios para a realização desta sessão, baseadas na Norma Interna nº 01/2010/COPGQ. Em seguida, o presidente da mesa concedeu a palavra ao candidato para a exposição do seu trabalho e, em sequência, aos examinadores, em ordem sucessiva, para arguir o apresentador. A duração da apresentação e o tempo de arguição e resposta deram-se conforme as normas do Programa. Ultimada a arguição, desenvolvida dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais e Aprovou o candidato. Por sugestão da Banca Examinadora, o título do trabalho será
Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto do DMAE - Uberlândia/MG

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento do estabelecido nas normas do Programa, legislação e regulamentação internas da UFU, em especial do artigo 55 da resolução 12/2008 do Conselho de Pós-graduação e Pesquisa da Universidade Federal de Uberlândia. Nada mais havendo a tratar, deu-se por encerrada a sessão às 11 horas e 10 minutos e lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pela Banca Examinadora.


Prof. Dr. Hernane da Silva Barud – UNESP


Prof. Dr. Rodrigo A. A. Muñoz – IQUFU


Prof. Guimes Rodrigues Filho – IQUFU
Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Guimes Rodrigues Filho pela orientação, sugestões e auxílios na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo da Hora Machado e ao Químico Paulo pela contribuição nas medidas de carbono incluídas neste trabalho.

Ao Professor Dr. Antônio Otávio de Toledo Patrocínio pelas importantes contribuições e questionamentos feitos durante o Exame de Qualificação e ao Professor Dr. Rodrigo Alejandro Abarza Muñoz pelas contribuições na qualificação e texto final da dissertação.

Ao Professor Dr. Hernane da Silva Barud pelas importantes contribuições feitas ao texto final da dissertação.

À Faculdade de Engenharia Química que proporcionou a execução de experimento utilizando bomba calorimétrica, em especial a Professora Valéria Viana e a Técnica Química Cleuzilene.

Às Doutorandas Carla e Júlia e as Mestrandas Sabrina e Elaine do Grupo de Pesquisa em Reciclagem de Polímeros pelos valiosos auxílios prestados no laboratório.

À secretária do Programa de Pós-graduação em Química da UFU, Mayta, pela atenção, simpatia e ajuda.

À Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao Instituto de Química.

Ao meu velho amigo Professor Natal Junio Pires que mesmo distante, nunca deixou de incentivar a realização deste trabalho. Obrigado pela força.

Ao Químico do DMAE Alan Soares Landim sendo quem primeiro abriu as portas para cursar Mestrado em Química sob a orientação do Prof. Dr. Guimes.

Ao DMAE Uberlândia pela oportunidade de realização desta pesquisa.

A minha cunhada Aline e ao meu cunhado Jardel pelos incentivos e auxílios sempre que precisei.

À minha querida família: Pai, mãe, irmãos, esposa e filha pelo apoio e carinho, em especial meu irmão Éverton, que me mostrou o quanto é forte e importante os sentimentos de um irmão.

À Deus por estar sempre ao meu lado e por me conceder saúde e força para vencer os obstáculos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho com imensa satisfação a minha filha Ana Luisa e minha esposa Kátia pelo amor, e pela compreensão nos momentos de ausência. Amo vocês.

“Educai os homens de hoje, para que não seja preciso castigar os homens amanhã”.

Pitágoras

SUMÁRIO	Páginas
Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Lista de símbolos e siglas	iii
Resumo	v
Abstract	vi
1 Introdução	1
1.1 O Tratamento de Esgotos	3
1.2 Biomassa	6
1.3 Lodo de esgoto	7
1.4 Consideração sobre o sistema de reator UASB	11
1.5 Aplicabilidade dos sistemas anaeróbios	14
1.6 Características favoráveis dos processos anaeróbios	15
1.7 Fundamentos da Digestão Anaeróbia e sua Microbiologia	17
1.8 Aspectos Termodinâmicos	19
1.9 Produção de Lodo em reator UASB	21
1.9.1 Produção e Composição do Lodo	24
2.0 Destino do Lodo de Esgoto	25
2.1 Operações e Processos Unitários de Tratamento do Lodo	26
2.2 Adensamento	26
2.3 Estabilização de lodo de esgoto	27
2.4 A natureza do material a ser seco	27
2.5 Condicionamento do Lodo para Desaguamento	29
2.6 Principais Processos utilizados na Desidratação de Lodo	32
2.7 Poder Calorífico de um combustível	36

3.0 Objetivos	41
3.1 Objetivos Gerais	41
3.2 Objetivos Específicos	41
4 Materiais e Métodos	42
4.1 Origem do Lodo de Esgoto	42
4.2 A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	42
4.3 Coleta e Preparo das amostras	43
4.4 Parte Experimental	44
4.4.1 Termogravimetria (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA)	44
4.4.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	44
4.4.3 Poder Calorífico	45
4.4.4 Determinação de Carbono Orgânico Total (COT)	45
4.4.5 Determinação dos Sólidos Totais (ST) Secos, Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV)	46
4.4.6 Infravermelho com Transformada de Fourier (IVTF)	46
5 Resultados e Discussão	47
5.1 Análise Térmica	47
5.2 Resultados de Medida Calorimétrica e Teores de Carbono	49
5.3 Teor de Sólidos	52
5.4 Espectro de Absorção na Região do Infravermelho	52
6 Conclusão	56
7 Sugestão para Trabalhos Futuros	57
8 Trabalho Oriundo Dessa Dissertação	58
9 Referências Bibliográficas	59

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1: Representação esquemática de um reator UASB.	13
Figura 2: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	18
Figura 3: Consumo mundial de energia e estimativa até o ano de 2020 (<i>em Gtep</i>).	23
Figura 4: Lodo de esgoto proveniente da ETE-Uberabinha disposto no aterro sanitário.	26
Figura 5: Micela de lodo orgânico.	28
Figura 6: Mecanismo da formação do floco com uso de polieletrólito.	30
Figura 7: Estruturas químicas de monômeros geralmente usados para síntese de copolímeros catiônicos de acrilamida. A: Monômero de acrilamida. B: Monômero catiônico tipo éster quaternário de amônio. C: Monômero catiônico tipo amida quaternária de amônio.	30
Figura 8: Expansão da cadeia do polieletrólito com a diminuição da força iônica.	31
Figura 9: Redução do volume de lodo em função do seu teor de água.	33
Figura 10: Centrífuga horizontal utilizada em desidratação.	35
Figura 11: Fluxograma do processo de tratamento – ETE Uberabinha.	43
Figura 12: Depósito do lodo desidratado em caçambas.	44
Figura 13: Curvas TG-DTA simultâneas do lodo anaeróbio desaguado.	47
Figura 14: Curva DSC para o lodo anaeróbico desaguado.	48
Figura 15: Espectro de Infravermelho para o lodo anaeróbico desidratado.	53
Figura 16: Infravermelho para resíduo gerado na bomba calorimétrica .	55

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1: Concentração de alguns constituintes dos esgotos domésticos não tratados.	5
Tabela 2: Principais meios de destinação dos lodos de esgoto em alguns países.	9
Tabela 3: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.	16
Tabela 4: Valores da energia livre padrão de algumas reações catabólicas da digestão anaeróbia.	20
Tabela 5: Características físico-químicas do lodo de esgoto segundo alguns autores.	22
Tabela 6: Custos de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto.	25
Tabela 7: Teor de sólidos no resíduo do tratamento de esgoto de acordo com o tipo de estabilização e equipamento / processo utilizado para o deságue.	36
Tabela 8: Composição Elementar típica e poder calorífico de tipos representativos de biomassa, carvão e turfa.	38
Tabela 9: Composição centesimal e teor de cinzas de alguns combustíveis selecionados.	39
Tabela 10: Poder calorífico de combustíveis em MJ/kg.	40
Tabela 11: Análise dos teores de carbono e poder calorífico.	49
Tabela 12: Atribuições das principais bandas do espectro infravermelho do lodo anaeróbio.	54

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

BRS – bactéria redutora de sulfato

COT – carbono orgânico total

DBO- demanda bioquímica de oxigênio

ΔG° - variação da energia livre de Gibbs padrão

ΔH – variação de entalpia

ΔT – variação de temperatura

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

DQO- demanda química de oxigênio

DSC- differential scanning calorimetry

DTA – Análise Térmica Diferencial

ETE- estação de tratamento de esgoto

ha – hectare

IVTF / FTIR – infravermelho com Transformada de Fourier

IR – infravermelho

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PCI- poder calorífico inferior

PCS- poder calorífico superior

PM- perda de massa (%)

RDF - refuse derived fuel

SDT – sólido dissolvido total

ST – sólidos totais

SST – sólidos suspensos totais

SV - sólidos voláteis totais

TEP – tonelada equivalente de petróleo

TG - termogravimetria

UASB / RAFA – upflow anaerobic sludge blanket reactor (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo)

RESUMO

O poder calorífico do lodo de esgoto produzido na Estação de Tratamento – ETE Uberabinha foi determinado neste trabalho, com objetivo de avaliar o seu potencial energético e assim apontar a possibilidade da utilização desta biomassa como combustível, somado ao fato desta utilização contribuir na solução do problema de descarte deste sólido no ambiente. Obtido pela digestão anaeróbia, seguido por desidratação em centrífugas, este material têm como destino o aterro municipal da cidade de Uberlândia-MG. Como as quantidades de lodo geradas vêm aumentando nos últimos anos, a caracterização físico-química deste resíduo é a primeira etapa para o seu aproveitamento energético, conduzindo a uma gestão ambientalmente consciente. Desta forma análises térmicas, incluindo a termogravimetria (TG), análise térmica diferencial (DTA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) em atmosfera de nitrogênio, análise do seu teor de carbono, além da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) do lodo, para conhecimento dos principais grupos orgânicos e inorgânicos presentes neste material, foram realizadas.

Os resultados experimentais indicaram uma exoterma acentuada na curva DTA por volta de 450°C, característico da decomposição de carbonos refratários, e com conteúdo entálpico 2,4 vezes superior ao da primeira exoterma localizada em 302°C. Análises caloriméticas revelaram um poder calorífico superior do lodo digerido anaerobicamente igual a 16,2 MJ.kg⁻¹ o qual compara-se favoravelmente com valores já reportados na literatura para outros lodos, gerados em plantas de tratamento de esgotos domésticos. Além disso, o poder calorífico para este lodo revelou ser da mesma ordem de grandeza do potencial energético de biomassas como a madeira úmida ou até mesmo superior ao de outras biomassas utilizadas na geração de energia tal como o bagaço de cana em briquete, com a possibilidade de um melhor desempenho quando do seu uso como combustível.

Este resíduo apresentou ainda relação sólidos voláteis / sólidos totais (SV/ST), de 65 % e quase que sua totalidade em carbono orgânico total frente ao seu conteúdo de carbono total, contribuindo positivamente para o aproveitamento energético da sua combustão.

Palavras-Chave: lodo UASB, poder calorífico, análises térmicas, infravermelho, biomassa

ABSTRACT

The calorific value of sewage sludge produced in treatment plant – STP Uberabinha was determined in this work, in order to evaluate its potential energy and thus point the possibility of using this biomass as fuel, plus the fact of this use contribute to solution the problem of disposal of this solid in the environment. Obtained by anaerobic digestion, followed by dewatering in centrifugal this material are destined for the municipal landfill of the city of Uberlândia-MG. As the quantities of sludge generated have been increasing in recent years, the physical chemical characterization of this waste is the first step for its energy use, leading to an environmentally conscious management. Thus thermal analysis, including thermogravimetry (TG), differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimeter (DSC) in nitrogen atmosphere, analysis of the content of carbon, beyond Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) of the sludge, to knowledge of the main groups organic and inorganic present in material, were performed.

The experimental results indicated a accentuated exotherm in the DTA curve around 450°C, characteristic of the decomposition of carbon refractory, and enthalpy content 2,4 time that of the first exotherm located at 302°C. Calorimeter analysis revealed a higher calorific value of anaerobically digested sludge equal to 16,2 MJ.kg⁻¹ which compares favorably with values previously reported in the literature for other sludge generated in sewage treatment plants sewage domestic. In addition, the calorific value for this sludge proved to be of the same order of magnitude of the energy potential of biomass as wet wood or even superior to other biomass used for energy generation such as sugar cane bagasse into briquette, with the possibility better performance when its use as fuel.

This residue also presented relationship volatile solids /total solids (VS/TS) 65%, and almost entirely in front of the total organic carbon content of total carbon, contributing positively to the energy use of its combustion.

Keywords: UASB sludge, calorific power, thermal analyses, infrared, biomass.

1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas e seus impactos associados causam importantes mudanças na composição natural das águas, levando frequentemente à poluição dos recursos hídricos naturais.

Descargas de esgotos são responsáveis por fortes mudanças nas condições da biota aquática. Os processos naturais de degradação que ocorrem em qualquer compartimento do ambiente são lentos, e para uma condição de lançamento adequada é necessário ao menos, uma remoção do material orgânico, diminuindo as cargas poluentes até um nível aceitável.

As águas poluídas devem ser tratadas para retirada das substâncias poluentes, para que os corpos receptores não tenham a sua capacidade de depuração prejudicada. (SANTOS, 2003). Sendo assim, vários sistemas de tratamento de esgotos - aeróbio, anaeróbio, físico-químico, são utilizados pelo homem moderno. Estes sistemas são, na maioria das vezes, eficientes na remoção de 'macro-poluentes' (presentes em concentrações da ordem de mg/L), dos quais se destacam a matéria orgânica biodegradável (proteínas, carboidratos e lipídeos causadores de demandas bioquímica e química de oxigênio (DBO e DQO)) e os nutrientes (nitrogênio e fósforo) (LEITE *et al* 2010).

Apesar de representarem a solução para o problema ambiental da poluição dos corpos d'água, os sistemas de tratamento de esgoto geram um resíduo sólido em quantidade e qualidade variável, denominado genericamente de lodo de esgoto. Grandes quantidades deste subproduto são geradas dia após dia, ano após ano, nas grandes cidades, sendo o seu destino final uma preocupação mundial (ANDREOLI, *et al.* 2001 (1)).

Segundo levantamentos feitos em vários países, o volume de lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é em torno de 1-2 % do volume de esgoto tratado, no entanto, seu tratamento e disposição final chega a atingir entre 30 e 50 % do custo de operação de uma ETE (FERREIRA *et al.*, 1999). A otimização da gestão dos lodos torna-se importante, de modo que os custos com os tratamentos sejam os menores possíveis.

Mais de 90% do lodo produzido no mundo tem sua disposição final por meio de três processos: incineração, disposição em aterros e uso agrícola (ANDREOLI, *et al.* 2001 (1)), os quais possuem procedimentos específicos e bem definidos na legislação ambiental e em

normas correlacionadas (MOTA, 1997). Quando o lodo está estabilizado, normalmente é realizada a disposição do mesmo em aterros sanitários ou aplica-se como fertilizante na agricultura, após tratamento adequado. Pesquisas sobre as características de composição de lodos domésticos indicam que muitos destes lodos podem ser classificados como "perigosos"¹, e conseqüentemente não é adequada a eliminação por deposição em aterro (KHAN *et al*, 1991).

No caso contrário, ou seja quando o lodo não está estabilizado, alguns processos lhe são aplicados com o intuito de adequá-lo às condições necessárias para o seu descarte. Alguns dos processos são: a estabilização para remoção da matéria orgânica; condicionamento para preparar para a desidratação; adensamento e desidratação para remover a umidade, com redução do volume (LAMAS, 2007); higienização e secagem.

Na busca de minimizar os custos de disposição final do lodo e as quantidades deste subproduto encaminhadas diariamente para os aterros sanitários, vários estudos vêm sendo realizados no Brasil e no mundo. Visto que na cidade de Uberlândia, o lodo de esgoto gerado pela maior ETE da cidade, é encaminhado para o aterro sanitário, propor soluções de aproveitamento deste resíduo, significa caminhar no sentido de garantir o progresso baseado no desenvolvimento sustentável.

Como o lodo de esgoto constitui um dos resíduos sólidos resultantes dos processos de tratamento de esgotos e face às tendências atuais de ser considerado uma das alternativas futuras para geração de energia da mesma forma que outras já estabelecidas fontes, a sua utilização minimizará o impacto resultante da sua destinação final. Desta forma, estudos abrangendo a obtenção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto (VIEIRA, *et al* 2011) e a sua aplicação em processos de fritura visando à valorização energética da sua incineração (SILVA, *et al* 2005 e ROMDHANA *et al*, 2009) representam alguns dos dispositivos das tendências atuais, para aproveitamento desta forma não convencional de energia, evitando o seu descarte no meio ambiente. Também o uso benéfico do lodo e das suas cinzas no setor de construção para fabricação de tijolos e cimentos, torna este resíduo uma matéria renovável para produtos comerciais (BURGER *et al*, 2008) trazendo benefício ambiental.

¹ Todo resíduo sólido ou mistura de resíduos sólidos que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem: apresentar risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou aumentando seus índices; apresentar riscos ao ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada; apresentar pelo menos uma, das características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade (ROCHA *et al*, 2009).

1.1 O TRATAMENTO DE ESGOTOS

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos, sendo que cerca de 70 % desses sólidos são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras e outros) e 30 % inorgânicos (areia, sais, metais, nitratos, ortofosfatos, amônia e outros), incluindo nesta, parcela de 0,1 % os microrganismos (SPERLING, 2005; CORREIA, 2009). Estes sólidos podem permanecer suspensos ou dissolvidos nos esgotos.

É devido a esta fração de 0,1 % que há necessidade de se tratar os esgotos, uma vez que pode ocasionar desde problemas estéticos (visuais e olfativos) a problemas de saúde pública e ambientais (CORREIA, 2009). Conforme mencionado, os principais materiais orgânicos biodegradáveis presentes nos esgotos são as proteínas, os carboidratos e os lipídios.

Os problemas de saúde pública se devem à presença de possíveis agentes transmissores de doenças de veiculação hídrica, resultado do lançamento indiscriminado de esgotos sanitários *in natura* nos corpos d'água, colocando em risco a saúde da população. Já o problema ambiental decorrente da poluição das águas é o consumo de oxigênio dissolvido pelos microrganismos, sendo a matéria orgânica presente nos esgotos a principal causadora deste problema (NUVOLARI *et al*, 2003).

O tratamento dos esgotos é usualmente classificado através dos seguintes níveis (CASSINI, 2008 e SPERLING, 2005):

- *Tratamento Primário*: visa à remoção de parte dos sólidos suspensos e da matéria orgânica presente no efluente. Esta remoção se dá geralmente por métodos físicos, tais como a sedimentação e a flotação. O efluente proveniente do tratamento primário ainda contém uma taxa considerável de matéria orgânica e uma demanda biológica de oxigênio relativamente alta, não devendo ser utilizado como única etapa de remoção de contaminantes, exceto em casos extremos. A principal função deste nível de tratamento é preparar o efluente para o tratamento posterior, a fim de otimizar a eficiência do mesmo.
- *Tratamento Secundário*: atua diretamente na remoção de compostos orgânicos biodegradáveis e sólidos suspensos. É definido como a combinação de processos

comumente usados para a remoção destes constituintes e inclui os tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios. O processo biológico escolhido vai depender do volume de efluente a ser tratado, da biodegradabilidade deste e da disponibilidade de espaço físico.

- *Tratamento Terciário*: métodos de tratamento nos quais a remoção ou conversão de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos ou devido a reações químicas como precipitação, adsorção e oxidação química, além de processos de separação por membranas. Algumas operações comuns do tratamento terciário são a remoção de fósforo através da coagulação química, remoção de resíduos orgânicos ou compostos que conferem cor ao líquido através da adsorção com carbono ativado e a remoção de sólidos dissolvidos através de processos com membranas.

Dados sobre a composição típica dos esgotos domésticos são relatados na tabela 1.

Tabela 1 Concentração de alguns constituintes dos esgotos domésticos não tratados.

Parâmetro	Unidade	Concentração	
		Intervalo	Média
Concentração do constituinte			
Sólido Total (ST)	mg/L	390 - 1230	720
Sólido Dissolvido Total (SDT)	mg/L	270 - 860	500
Fixo	mg/L	160 - 520	300
Volátil	mg/L	110 - 340	200
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	120 - 400	210
Fixo	mg/L	25 – 85	50
Volátil	mg/L	95 - 315	160
DBO ₅ ^{20 (2)}	mg/L	110 - 350	190
Carbono Orgânico Total (COT)	mg/L	80 - 260	140
DQO ³	mg/L	250 - 800	430
Nitrogênio Total (como N)	mg/L	20 – 70	40
Fósforo Total (como P)	mg/L	4 – 12	7
Cloreto	mg/L	30 – 90	50
Sulfato	mg/L	20 – 50	30
Óleos e Graxas	mg/L	50 - 100	90

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2009.

No passado, a maior preocupação era com o desenvolvimento e adequação dos processos de tratamento da fase líquida (LIRA, *et al.* 2008). Atualmente, com o aumento do número de estações de tratamento de esgotos instaladas, vem ganhando cada vez mais expressão no Brasil, o gerenciamento do lodo excedente gerado nestas ETEs. Por se tratar de um subproduto sólido com característica poluente tanto pelos níveis de patógenos, quanto pelos teores de nutrientes indesejados presentes, a sua destinação final é uma operação necessária e bastante complexa por envolver aspectos técnicos, econômicos,

² Quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica degradada pela ação de bactérias, sob condições aeróbicas controladas (período de cinco dias a 20°C) (ROCHA *et al.*, 2009).

³ Quantidade de oxigênio necessária para oxidar a fração orgânica e inorgânica de uma amostra que seja oxidável pelo dicromato de potássio em solução ácida (ROCHA *et al.*, 2009).

ambientais e legais, que muitas vezes ultrapassam os limites da ETE (ANDREOLI et al, 2001 (2)).

1.2 BIOMASSA

Segundo HUMBERTO (2004), biomassa é a matéria orgânica da terra, principalmente, os resíduos de plantas. Do ponto de vista energético, para fim de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. No campo da energia, o termo biomassa é usado para descrever todas as formas de plantas e derivados que podem ser convertidos em energia utilizável como:

- Madeira;
- Resíduos urbanos e florestais;
- Grãos;
- Talos;
- Óleos vegetais;
- Lodo de tratamento biológico de efluente.

Uma das formas de utilização da biomassa é através da queima direta para produzir energia térmica e elétrica. É uma fonte primária de energia e que está em desenvolvimento em muitos países.

Da mesma forma que ocorre com o bagaço de cana, que é considerado um grande empecilho nas usinas, pois é produzido em grandes quantidades (30% da cana), além de ocupar grandes áreas e pode vir a sofrer combustão espontânea, o lodo de esgoto é considerado um problema nas ETEs pelos gestores responsáveis pelos sistemas de tratamento de esgotos. Devido ao fato daquele resíduo agrícola possuir grande porcentagem de fibras, o que lhe concede boas características combustíveis, juntamente como fato de ser um combustível gratuito, o bagaço de cana pode ser queimado em caldeiras visando à geração de vapor para o processo (YOSHIMA, *et al* 2005). Esta idéia pode contribuir para que o resíduo orgânico mais conhecido como lodo, gerado em grandes quantidades nos sistemas de tratamento de esgotos das várias cidades brasileiras, possa ser utilizado com a mesma finalidade.

Sendo uma biomassa que pode ser aproveitada para geração de energia, os lodos de tratamento de efluentes devem ser avaliados para aplicação industrial em questão, não podendo apresentar características críticas como um baixo valor calorífico influenciado pela umidade do material, requerendo preliminarmente deságüe, e/ou um tratamento de secagem em termos de sólidos em cerca de 30 a 35% na ordem de sólidos, para a possibilidade de uma combustão auto-sustentável (CAMPREGHER, 2005).

1.3 LODO DE ESGOTO

O destino final dos resíduos produzidos nos sistemas de tratamento de esgotos é uma preocupação mundial. O resíduo sólido gerado em estações de tratamento e que mais preocupa as concessionárias responsáveis pela operação destes sistemas, é o resíduo denominado genericamente de lodo de esgoto. Possui uma composição que depende do tipo de tratamento empregado e das características das fontes geradoras, ou seja, se proveniente de uma área tipicamente residencial ou industrial.

Uma vez que o processo de obtenção do lodo de esgoto apresenta particularidades quanto à região e o sistema utilizado em cada ETE, o lodo resultante é um material heterogêneo contendo quantidades variáveis de água, nutrientes, matéria orgânica, microrganismos e metais pesados (ROMEIRO, 2007).

As fontes de geração de lodo numa estação de tratamento de esgoto são as unidades de operações primárias, as secundárias ou biológicas e os processos de tratamento do lodo (CORREIA, 2009):

- Lodo bruto ou primário composto por sólidos sedimentáveis gerado nos decantadores primários, com coloração acinzentada, pegajoso, odor ofensivo, facilmente fermentável, e de fácil digestão em condições adequadas de operações da estação de tratamento de esgoto;
- Lodo biológico ou secundário é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto afluente. Gerado em reatores biológicos, com aparência floculenta, coloração de marrom a preta, odor pouco ofensivo quando fresco e pode ser digerido sozinho ou misturado ao lodo primário (neste caso chamado de lodo misto);

- Lodo digerido aquele que sofreu estabilização biológica aeróbia ou anaeróbia, não possui odor ofensivo e é marrom escuro;
- Lodo químico originário do tratamento do esgoto que inclui etapas físico-químicas para melhorar o desempenho dos decantadores primários;

No lodo estão contidas todas substâncias oriundas das atividades industriais, dos hábitos alimentares e do nível de saúde da população atendida pelas redes de esgoto, retratando exatamente as características dessa comunidade (MORAES, 2005).

Para CHAGAS (2000), a disposição final do lodo de esgoto é um dos problemas ambientais urbanos mais relevantes da atualidade.

Segundo PEDROZA *et al* (2010), a produção anual de lodo no Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas ao ano (expresso em matéria seca), quantidade esta considerada baixa em relação ao que se deveria ter, principalmente quando se leva em conta os padrões de abrangência de tratamento de esgoto existente nos países mais desenvolvidos.

Os aterros sanitários são o destino mais comum para a disposição do lodo produzido no Brasil (VIEIRA *et al.*, 2011) (tabela 2). Apesar da disposição em aterros ser simples, pode ocorrer o problema do solo deste local não ser impermeabilizado, juntamente com a ausência de um sistema de drenagem dos líquidos percolados, que podem permear e entrar em contato com águas subterrâneas e solo, causando grande impacto ambiental.

Portanto, a disposição em aterros requer cuidados especiais em relação à seleção de local, características de projeto que evitem a percolação de lixiviado, à drenagem dos gases gerados e ao tratamento do chorume produzido, assim como a uma operação eficiente que evite a proliferação de vetores (ANDREOLI *et al.*, 2001 (1)) .

Tabela 2 Principais meios de destinação dos lodos de esgoto em alguns países.

País	Método de disposição (como % do total produzido)			
	Aterros	Agricultura	Incineração	Outros
França	50	50	0	0
Alemanha	25	63	12	0
Itália	34	55	11	0
Portugal	80	13	0	7
Espanha	10	50	10	30
Japão	6	14	80	0
EUA	30	20	30	20
Brasil	80	5	0	15

Fonte: DUARTE (2008).

Atribuído à sua composição rica em matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, o lodo de esgoto tem sido fortemente sugerido para a aplicação na agricultura como condicionador e fertilizante do solo. Os benefícios que poderiam ser obtidos com sua aplicação seriam quanto à reciclagem da matéria orgânica e o aporte de nutrientes no solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas e a produtividade agrícola. Entretanto, como o lodo contém elevadas concentrações de contaminantes, essa prática pode resultar em adição direta de patógenos diversos e substâncias químicas não desejadas no solo agriculturável e conseqüentemente na cadeia alimentar (SAITO, 2007).

Segundo GUERRA (2007), o lodo de esgoto pode apresentar uma alta contaminação microbiológica. Os microrganismos patogênicos presentes no lodo, além de variar de uma região para outra, dependem do processo de tratamento do esgoto. Dentre os microrganismos patogênicos, cinco grupos podem estar presentes no lodo: helmintos, protozoários, fungos, bactérias e vírus.

Quando se utiliza o lodo de esgoto doméstico como condicionador ou fertilizante, o mesmo confere aos solos, uma maior capacidade de retenção de água e de nutrientes minerais, maior resistência à erosão, podendo auxiliar na melhoria das práticas agrícolas atualmente em uso no nosso país, além de oferecer ao resíduo gerado, um destino final ambientalmente adequado (DORES-SILVA *et al.*, 2011).

O lodo de esgoto devidamente tratado, e que pode ser utilizado como fertilizante e condicionador de solo por ser rico em nutrientes e matéria orgânica, é chamado de biossólido (LIRA, *et al.* 2008).

O lodo de esgoto normalmente contém uma grande quantidade de matéria orgânica que é responsável pela presença de sólidos voláteis e altas concentrações de microrganismos patogênicos (SILVA, 2004).

Assim, a matéria orgânica no lodo é representada pela relação sólidos voláteis / sólidos totais, SV/ST, em %. Valores típicos para lodo gerado em estações de tratamento de esgotos domésticos estão na faixa de 75 a 85 %.

A verificação do percentual de SV/ST é importante em relação aos processos de estabilização biológica (digestão), de incineração, aplicação no solo, produção de fertilizantes, e como indicador para potenciais problemas de odor nos casos de armazenagem e manuseio (JORDÃO *et al.*, 2005).

Os lodos frescos constituem suspensões heterogêneas de substâncias orgânicas e inorgânicas incluindo gorduras, carboidratos e proteínas em teores variáveis. Com a digestão são conseguidas a liquefação, gaseificação, a mineralização e a humificação da matéria orgânica. A liquefação compreende a produção e liberação de água, assim como, a transformação de grandes partículas de lodo em substâncias solúveis ou finamente dispersas. Este parece ser um processo extracelular, que depende fundamentalmente da ação enzimática. A gaseificação é um processo intracelular considerado essencial para a digestão. Aliás, a boa operação das instalações consiste justamente no equilíbrio e na harmonia destas duas fases.

A parcela de matéria orgânica que não é convertida em gás apresenta condições de maior estabilidade, sendo excedida pela quantidade de substâncias minerais (mineralização). O produto final, relativamente estável, sem cheiro ofensivo e de cor escura, assemelha-se ao húmus, isto é, a matéria orgânica encontrada em terrenos onde existem detritos vegetais em decomposição lenta.

A matéria orgânica do lodo bem digerido consiste principalmente de húmus ou de constituintes húmicos, substâncias estas que se decompõem muito lentamente (CHAGAS, 2000).

Também é importante mencionar, que quanto maior os sólidos voláteis, mais difícil será a desidratação, acarretando um alto consumo de floculante (SNF, 2003). Portanto quanto maior a porcentagem de sólidos fixos no lodo, mais fácil será desaguar o lodo de ETE (SPELLMAN, 1997).

Para GÖTTSCHING e PAKARINEN (2000) *apud* CAMPREGHER (2005), os diversos destinos que o lodo pode ter são: a incineração com recuperação de energia, e o uso das cinzas ou simplesmente a incineração; o processo de compostagem e seu uso na agricultura; na produção de cimento; fabricação de tijolos, produção de concreto; na produção da massa para montagem de parede com areia, cal e os tijolos; na construção de rodovia e depósitos nos mais diversos aterros.

1.4 CONSIDERAÇÃO SOBRE O SISTEMA DE REATOR UASB

Sistemas de tratamento biológico da fase líquida, muito utilizados em países de clima tropical como o Brasil, são os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA), também conhecidos internacionalmente como reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors). Na tradução para o português, os mesmos deveriam ser denominados *Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo* (CHERNICHARO, 1997). Trata-se de uma tecnologia anaeróbia, onde a digestão do lodo ocorre no próprio reator de tratamento de esgotos, apresentando um lodo com mínimo de odor, porém ainda com alta concentração de patógenos.

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB) constituem-se na principal tendência atual de tratamento de esgotos no Brasil, como unidades únicas, ou seguidas de alguma forma de pós-tratamento. Nos reatores UASB, a biomassa cresce dispersa no meio, e não aderida a um meio suporte especialmente incluído, como o caso de filtros anaeróbios.

A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, justificando a denominação de manta de lodo. Devido a esta alta concentração, o volume requerido para os reatores anaeróbios de manta de lodo é mais reduzido, em comparação a todos os outros sistemas de tratamento.

O processo de tratamento de efluentes por reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB) dá-se pela seguinte maneira (SPERLING, 2005):

- O líquido entra ascendentemente pelo fundo do reator e se encontra com o leito de lodo, o que causa a adsorção de grande parte da matéria orgânica pela biomassa. Como resultado da atividade anaeróbia, são formados gases (principalmente metano e carbônico) e bolhas que apresentam tendência a flotação. Esta etapa da digestão se procede no compartimento denominado *câmara de digestão*;
- De modo a conter a biomassa no sistema, impedindo que ela saia com o efluente, a parte superior dos reatores de manta de lodo apresenta uma estrutura que possibilita as funções de separação e acúmulo de gás e de separação e retorno dos sólidos (biomassa) (ver figura 1). Esta estrutura consiste de um *separador trifásico* ou *separador de fases*, por separar o líquido, os sólidos e os gases, que por sua vez são coletados pela parte superior do compartimento de gases ou *zona de acumulação de gases*, de onde são retirados para reaproveitamento (energia proveniente do metano) ou queima;
- Já os sólidos sedimentam-se na parte superior externa desta estrutura cônica ou piramidal, no compartimento de sedimentação (*zona de sedimentação*), deslizando pelas suas paredes com grande inclinação, até retornarem ao corpo do reator. Assim, tem-se a retenção de grande parte da biomassa no sistema, alcançada por simples retorno gravitacional;
- O espaço compreendido entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação constitui a *zona de transição*, onde ocorrem as reações necessárias para estabilizar a matéria orgânica. Sendo assim, o efluente sai do compartimento de sedimentação relativamente clarificado por meio de vertedores ou tubulações perfuradas e segue para a etapa de pós-tratamento ou para o corpo receptor.

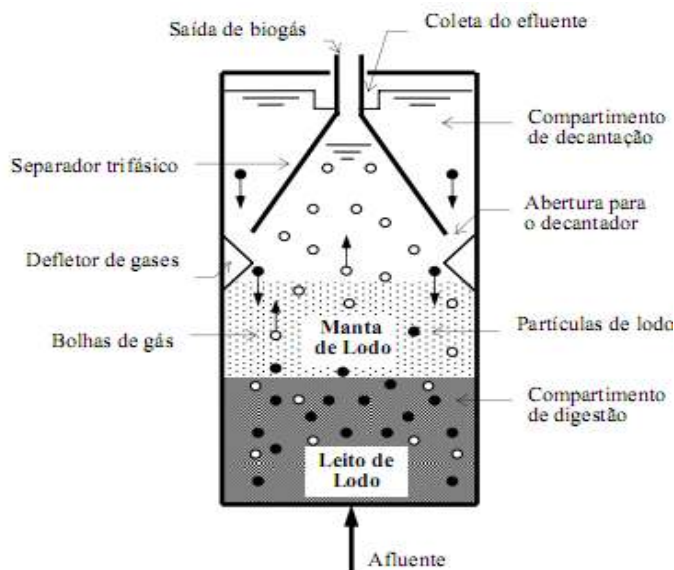


Figura 1 Representação esquemática de um reator UASB.

Fonte: CHERNICHARO, 1997.

A utilização de um processo anaeróbico como os reatores tipo UASB para o tratamento de águas residuais, ocorre de modo que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no esgoto seja convertido em biogás (70 a 90 %), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (de 5 a 15 %), constituindo o lodo excedente do sistema. Já o material não convertido em biogás ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (10 a 30 %) (CHERNICHARO, 1997).

Contudo, esses reatores geralmente são pouco eficientes na remoção de nutrientes eutrofizantes (nitrogênio e fósforo), podem liberar maus odores e seus efluentes apresentam valores relativamente elevados de DBO e sólidos suspensos. Por causa dessas limitações, e para atender aos requisitos da legislação ambiental brasileira, os efluentes de reatores anaeróbios geralmente necessitam de tratamento complementar (SANTOS, *et al.*, 2003).

Os dois subprodutos gerados no tratamento anaeróbico (biogás e lodo), podem ser reaproveitados, através da implantação de sistemas integrados de proteção ambiental, além de poder garantir a autossustentabilidade da instalação de tratamento em termos de requisitos de energia elétrica (SHIZAS *et al.*, 2004), apesar de alguns autores como

COELHO *et al* (2003), ressaltarem que o volume de biogás gerado no tratamento anaeróbio, não permitir a auto-suficiência de operação da ETE .

Normalmente, quando o gás não é consumido em instalações anaeróbias, o mesmo é queimado. O principal componente do biogás, quando se pensa em utilizá-lo como combustível, é o metano (PECORA, 2006). Assim, o potencial energético do biogás é uma função da sua quantidade de metano, o que determina o seu poder calorífico (SALOMON *et al*, 2005). O biogás é constituído por cerca de 60 a 80% de metano, 20 a 30% de dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros elementos, como N₂, H₂, H₂S e NH₃, sendo que nas grandes plantas, o gás dos reatores pode ser utilizado como combustível para caldeiras e motores de combustão interna, e na geração de eletricidade (METCALF & EDDY, 1977).

Segundo COELHO *et al*. (2006), para que o biogás possa ser utilizado como combustível, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, é necessário identificar sua vazão, composição química e poder calorífico, parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia elétrica, além de permitir dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção H₂S (gás sulfídrico) e da umidade, com o propósito de evitar danos aos equipamentos da instalação e aumentar seu poder calorífico.

No que diz respeito ao subproduto sólido do tratamento de esgoto conhecido como lodo, este deve ser conduzido a uma etapa de tratamento adequada, e ser encaminhado a um programa de gestão de resíduos. Medidas antes empregadas no seu gerenciamento vem se tornando cada vez mais restritivas, tal como aterramento do material, o que vêm exigindo das concessionárias investimentos e adoção de técnicas ambientalmente corretas no seu destino final. Embora mais exigentes, as agências ambientais têm incentivado o emprego agrícola do lodo, desde que apresente características adequadas a esta finalidade. Uma das exigências quanto às qualidades requeridas é a sua higienização, a qual pode ser alcançada empregando-se mecanismos químicos, físicos e biológicos aplicados combinados ou isoladamente (BORGES *et al*. 2009), em que se destacam: digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, radiação beta e gama, pasteurização, tratamento térmico e caleação (ANDREOLI, *et al.*, 2001 (1)).

1.5 APLICABILIDADE DOS SISTEMAS ANAERÓBIOS

Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, no entanto não se pode questionar que o processo se mostra mais eficiente e econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis (CHERNICHARO, 1997).

A tecnologia anaeróbia tem sido utilizada no tratamento de esgotos domésticos, principalmente através dos reatores tipo UASB, sendo a versão mais aperfeiçoada desses reatores com origem na Holanda, na década de 70, na Universidade de Wageningen. Esta tecnologia é considerada uma forma de tratamento bastante atrativa para os países de clima tropical e subtropical, devido à baixa atividade das bactérias anaeróbias em temperaturas abaixo de 20°C (CHERNICHARO, 1997).

Os sistemas anaeróbios são passíveis de serem operados com elevados tempos de retenção de sólidos e baixíssimos tempos de detenção hidráulica, conferindo aos mesmos um grande potencial para a sua aplicabilidade em tratamentos de águas residuárias de baixa concentração, como são os esgotos sanitários, além de ser uma tecnologia simples e de baixo custo (MENDES, *et al.*, 2007)

1.6 CARACTERÍSTICAS FAVORÁVEIS DOS PROCESSOS ANAERÓBIOS

A fusão do tratamento de efluentes com a produção de energia renovável é o foco dos sistemas integrados de proteção ambiental, que direcionam forças para os desafios mais prementes que a sociedade enfrenta: escassez de água e sustentabilidade energética.

Por muitos anos, os processos de lodos ativados foram quase a única tecnologia para tratamento de águas residuais. No entanto, a tecnologia anaeróbia surgiu como uma tecnologia bem estabelecida, quer como um meio para reduzir as emissões (por exemplo, menor produção de biomassa ou águas residuais não tratadas), e como um meio para produzir energia renovável (biogás por exemplo) (COSTA, 2008). Segundo TAVARES (2010) os processos anaeróbios produzem quantidades menores de lodo, sendo esta uma das principais vantagens do seu uso.

Na Tabela 3 estão resumidas as principais vantagens e desvantagens da tecnologia anaeróbia de tratamento de águas residuais (CHERNICHARO, 1997 e COSTA, 2008).

Tabela 3 Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

Vantagens	Desvantagens
Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios.	As bactérias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos.
Baixo consumo de energia, usualmente associada a uma elevatória de chegada, uma vez que não há custos de aeração. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos.	A partida do processo pode ser lenta na ausência de lodo de semeadura ⁴ adaptado.
Baixa demanda de área.	Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária.
Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares <i>per capita</i> .	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e precisam ser mais estudadas.
Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico.	Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis.
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses.	Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável.
Tolerância a elevadas cargas orgânicas.	Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatórios.
Aplicabilidade em pequena e grande escala.	Falta de modelos e sistemas de controle.
Baixo consumo de nutrientes.	Sensibilidade do processo a mudanças das condições ambientais (pH, temperatura, sobrecargas orgânicas e hidráulicas).

Fonte: CHERNICHARO, 1997

Tratamento anaeróbio é considerado a principal tecnologia para recuperação de energia e nutrientes, a partir de águas residuárias, pois converte a matéria orgânica em metano, que pode ser usado para produzir eletricidade e calor, além de produzir ao mesmo tempo pequenas quantidades de excesso de lodo.

Os nutrientes geralmente são conservados, sendo encontrados na fase líquida após tratamento anaeróbio, e podem ser posteriormente recuperados com processos físico-químicos tais como precipitação e troca iônica ou removidos biologicamente (GRAAFF *et al.*, 2010).

⁴ Termo utilizado quando inocula-se reatores UASB com determinadas quantidades de lodo anaeróbio para acelerar a sua partida ou *start up*.

1.7 FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA E SUA MICROBIOLOGIA

A digestão anaeróbia é o processo biológico através do qual os materiais orgânicos são degradados na ausência de oxigênio para produzir um gás combustível, o metano (CH_4), e dióxido de carbono (CO_2), designados em conjunto por biogás. Outros componentes como o hidrogênio molecular (H_2), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3) estão presentes no biogás em quantidades traço (BARBOSA, 2008).

O processo de digestão anaeróbia é realizado por três importantes grupos de bactérias – que constituem um consórcio microbiano formado pelas: bactérias fermentativas, bactérias acetogênicas e bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

O processo de digestão anaeróbia realiza-se numa sequência de quatro fases principais, como descrito a seguir.

Inicialmente os microrganismos fermentativos excretam enzimas extracelulares que catalisam a hidrólise de polímeros existentes no substrato, em materiais dissolvidos mais simples (monômeros e oligômeros), os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas (CHERNICHARO, 1997).

Os compostos solubilizados são transportados para o interior das células das bactérias, onde se realiza a fermentação a compostos mais simples. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio (BARBOSA, 2008). Como o principal produto das bactérias fermentativas são os ácidos graxos voláteis, estas são também conhecidas como bactérias fermentativas acidogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Na fase seguinte, as bactérias acetogênicas utilizam os produtos gerados na fase acidogênica, convertendo-os em compostos ainda mais simples como o acetato, gás carbônico e hidrogênio (BARBOSA, 2008).

A última etapa do processo de degradação anaeróbia é efetuada pelas bactérias metanogênicas. A produção de metano pode ocorrer a partir do acetato por bactérias metanogênicas acetoclásticas (responsáveis por 70 % de toda a produção de metano) ou a partir de hidrogênio e dióxido de carbono por meio das bactérias metanogênicas hidrogenotróficas (CHERNICHARO, 1997). Outros substratos da metanogênese podem ser compostos simples metilados (Ex. formiato) ou álcoois + CO_2 (BARBOSA, 2008).

Uma representação esquemática das bactérias atuantes na digestão anaeróbia e suas respectivas fases é apresentado na figura 2 a seguir.

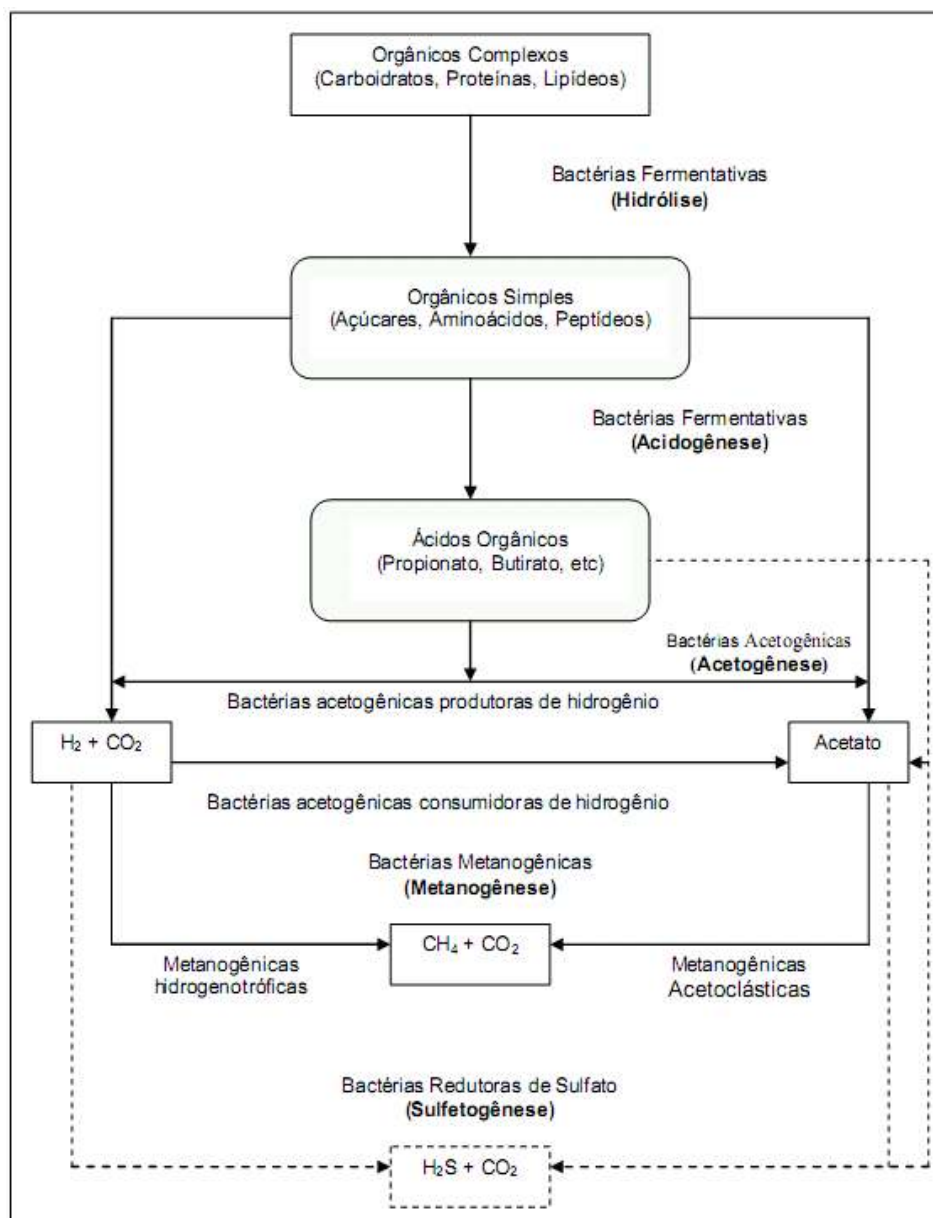
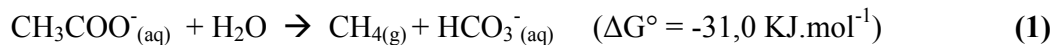


Figura 2 Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.
Fonte: CHERNICHARO, 1997.

A reação metabólica catalisada pelas espécies heterotróficas que utilizam o acetato como substrato (principalmente *Methanosarcina*) é a seguinte:



A reação metabólica catalisada pelas bactérias hidrogenotróficas é a seguinte (PARAWIRA, 2004):



1.8 ASPECTOS TERMODINÂMICOS

Em geral, as considerações sobre a termodinâmica do processo anaeróbio se restringem à análise da variação da energia livre padrão (ΔG°).

Uma grande variedade de compostos orgânicos presentes nos esgotos domésticos podem ser degradados nos reatores anaeróbios por grupos de bactérias, que constituem um consórcio microbiano diversificado. Também é enorme o número de caminhos catabólicos que podem ocorrer na conversão daqueles compostos em metano.

No entanto, estes caminhos só são possíveis caso seja produzida energia livre em cada um dos processos de conversão, aproveitável para o microrganismo atuante na reação, para que este possa realizar seu anabolismo. Se o processo catabólico não gerar energia, o processo anabólico não ocorre e o metabolismo se torna inviável (FORESTI *et al.*, 1999).

Para saber se a reação catabólica libera energia livre, utiliza-se o conceito termodinâmico mencionado. Quando ocorre a liberação de energia, o processo é denominado exergônico e a energia livre padrão (ΔG°) é menor que zero. Quando as reações consomem energia são denominadas endergônicas e a energia livre apresenta valores positivos. A energia livre de uma reação normalmente se encontra tabelada sob condições-padrão, ou seja, temperatura de 25°C, pH = 7 e pressão de 1 atm (101 kPa). Em soluções aquosas, a condição-padrão de todos os reagentes e produtos de uma reação é uma concentração (atividade) de 1 mol.kg⁻¹, enquanto a condição-padrão da água é o líquido puro. A energia livre nas condições reais do sistema de tratamento pode ser calculada segundo a equação 1.

$$\Delta G_r = \Delta G_r^\circ + RT \ln [(C)^c.(D)^d...]/[(A)^a.(B)^b...] \quad \text{equação 1}$$

onde:

ΔG_r : energia livre de reação sob condições atuais no reator;

ΔG_r° : energia livre *padrão* de reação;

R: constante universal dos gases = $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$;

T: temperatura em K;

(A)^a, (B)^b: concentrações fisiológicas dos substratos com os coeficientes respectivos;

(C)^c, (D)^d: concentrações fisiológicas dos produtos formados com os coeficientes respectivos;

Algumas das reações importantes nos processos anaeróbios e a respectiva energia livre padrão (ΔG°) são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da energia livre padrão de algumas reações catabólicas da digestão anaeróbia.

Processo	Reações	ΔG° (kJ.mol ⁻¹)
Propionato a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-_{(\text{aq})} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + \text{H}^+_{(\text{aq})} + \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + 3 \text{H}_{2(\text{g})}$	+ 76,1
Butirato a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_{2(\text{g})}$	+ 48,1
Etanol a acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}_{(\text{l})} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_{2(\text{g})}$	+ 9,6
Lactato a acetato	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^-_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_{2(\text{g})}$	- 4,2
Acetato a metano	$\text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + \text{CH}_{4(\text{g})}$	- 31,0
Bicarbonato a acetato	$2 \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + 4 \text{H}_{2(\text{g})} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})} + 4 \text{H}_2\text{O}$	- 104,6
Bicarbonato a metano	$\text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + 4 \text{H}_{2(\text{g})} + \text{H}^+_{(\text{aq})} \rightarrow \text{CH}_{4(\text{g})} + 3 \text{H}_2\text{O}$	-135,6

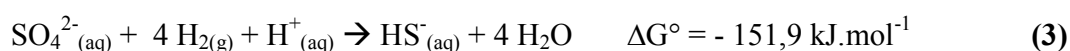
Fonte: CHERNICHARO, 1997 e COSTA, 2008.

Para um bom desempenho dos reatores anaeróbios é imprescindível que os compostos sejam convertidos em precursores imediatos de metano, ou seja, acetato e hidrogênio. Não havendo essa conversão, tampouco haverá metanogênese, ocorrendo o acúmulo dos produtos da fase de hidrólise e fermentação no reator (FORESTI et al., 1999).

A acetogênese não ocorre espontaneamente no sentido da formação de acetato e H_2 , a menos que essas espécies químicas sejam removidas do meio, por metanogênese, deslocando o equilíbrio da reação no sentido da formação desses produtos. Assim, as três primeiras reações da tabela 4 acima, são desfavoráveis termodinamicamente ($\Delta G^\circ > 0$).

Todavia, as reações podem se deslocar para direita, caso ocorra à remoção de H₂ do meio, através das duas últimas reações também presentes na tabela 4, que ocorrem através das bactérias consumidoras de hidrogênio.

A liberação de gases odoríferos de sulfeto de hidrogênio (H₂S) é uma característica de ambientes anaeróbios, no qual o sulfato sofre redução (recebe elétrons) (KHANAL, 2008), durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante este processo, sulfato é reduzido a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (BRS) ou bactérias sulforedutoras (CHERNICHARO, 1997) de acordo com a equação:



Quando há presença de sulfato no afluente, muitos dos compostos intermediários passam a ser utilizados pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), provocando uma alteração das rotas metabólicas no reator anaeróbio. Dessa forma, as BRS passam a competir com as bactérias fermentativas, acetogênicas e arqueas metanogênicas pelos substratos disponíveis (MORAES, 2005).

1.9 PRODUÇÃO DE LODO EM REATOR UASB

A produção de lodo em reatores UASB, utilizados no tratamento de esgoto doméstico, segundo diferentes autores é apresentado na tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Características físico-químicas do lodo de esgoto segundo alguns autores.

Características Autores	Geração de Lodo (Primário e Secundário) g ST.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	Teor de Sólidos %	Quantidade de Lodo Estabilizado L.hab ⁻¹ .dia ⁻¹
Haskoning	10 – 20	5 - 10	0,2
Vieira & Souza	22	7,2	0,31
Haskoning et al.	15	6 – 8	0,21
Van Haandel & Letinga	16	5 – 7,5	0,26

Fonte: Adaptado de MORAES (2005).

Os reatores anaeróbios, principalmente os de leito móvel (i.e., reatores UASB), são capazes de promover a remoção de grande parte da matéria orgânica presente no esgoto (geralmente em torno de 70%) sem qualquer gasto de energia no processo e com baixa produção de lodo em comparação com sistemas aeróbios convencionais (SANTOS, *et al.*, 2003).

Normalmente o teor de umidade do lodo bruto varia na faixa de 90 a 99% o que eleva consideravelmente o volume de lodo produzido nas ETEs (MORAES, 2005).

Os processos de tratamento de lodo visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água para que se obtenha um material sólido e estável, que não constitua perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a baixo custo (ANDREOLI, 2006(1)).

A eliminação e disposição dos resíduos urbanos e industriais, tem sido, e é atualmente, um grande problema de saúde pública além de que a sua gestão acarreta em altos custos, devido a diversos fatores, como o crescimento acelerado da população e a instalação de novas indústrias, a diminuição de lugares apropriados para aterros sanitários,

a constante produção de resíduos (CASTELLS, 2005) e o desperdício exarcebado associado ao consumismo da população. Por exemplo, uma cidade gerando 25 t/dia de lodo em base seca (300.000 – 500.000 habitantes), dependendo da tecnologia utilizada no aterro, necessitará de 2 a 20 ha/ano para dispor seu lodo (FERREIRA, et al., 1999).

Segundo VIEIRA *et al.* (2011) nos EUA, a disposição do biossólido em aterros sanitários vem sendo reduzida gradativamente, devido aos elevados custos e a dificuldade em se encontrar áreas apropriadas a esse fim.

Além do problema associado aos resíduos, soma-se a necessidade por fontes de energia, devido a diminuição das reservas dos recursos não renováveis (CASTELLS, 2005), ocasionado principalmente pelo crescente consumo de combustíveis fósseis.

Na figura 3 é mostrado o consumo energético real e o previsto desde 1970 a 2020.

Segundo CASTELLS (2005), frente a esta problemática, existe a alternativa de aproveitar o potencial energético dos resíduos por diferentes métodos e de forma econômica.

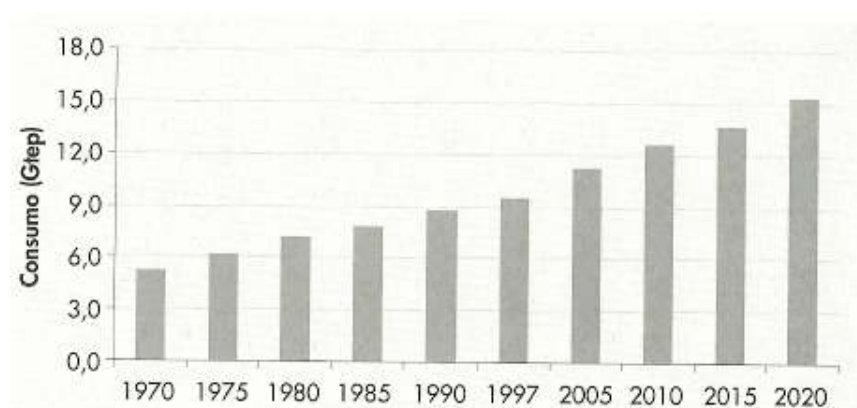


Figura 3 Consumo mundial de energia e estimativa até o ano de 2020 (*em Gtep*).

Fonte: CASTELLS, *et al* 2005.

As ETEs são grandes consumidoras de energia, mas de acordo com as circunstâncias, também poderão gerá-la. A construção da sua autonomia pode ser obtida desde a geração de biogás até uma segunda etapa, que seria aproveitar o poder calorífico dos lodos (CASTELLS, 2005).

Também segundo CAMPREGHER (2005) algumas indústrias estão incinerando seu lodo para tentar resolver o problema da insuficiência de espaços em aterros.

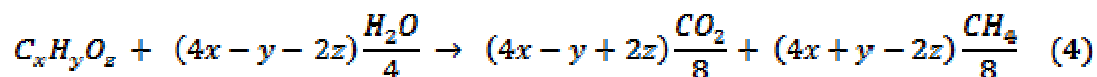
1.9.1 PRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO DO LODO

Em sistemas biológicos de tratamento de esgoto há uma massa de microrganismos responsável pela degradação ou estabilização da matéria orgânica. As bactérias são os microrganismos presentes em maior quantidade, utilizando o material orgânico tanto como fonte de material como, também, fonte de energia e por isso se denominam bactérias heterotróficas.

A transformação do material orgânico em massa celular é um processo chamado de anabolismo, o qual depende da disponibilidade de energia química para a bactéria. Já a transformação do material orgânico em produtos estabilizados é chamado de catabolismo, o qual libera energia necessária para as bactérias para o desenvolvimento do anabolismo (ANDREOLI, 2006 (2)).

O catabolismo pode ser oxidativo ou fermentativo, sendo o processo fermentativo de maior interesse para a engenharia sanitária e ambiental a conhecida digestão anaeróbia.

No catabolismo fermentativo ocorre então a transferência intramolecular de elétrons, de tal maneira que o composto catabolizado se decompõe em pelo menos duas partes. Se o processo fermentativo for a digestão anaeróbia os produtos finais serão o metano e o dióxido de carbono. Para a fórmula geral $C_xH_yO_z$ a digestão anaeróbia pode ser expressa como:



A proporção entre a massa de material orgânico utilizada nos processos anabólico e catabólico depende da quantidade de energia liberada no catabolismo. O efeito energético do catabolismo oxidativo é muito mais expressivo do que o do catabolismo fermentativo, porque neste, grande parte da energia química, originalmente presente no material orgânico fermentado, permanece contido no metano. Portanto a energia disponível para o processo anabólico é maior para as bactérias que usam o catabolismo oxidativo (aeróbias), e desta

forma, tendem a crescer mais que as bactérias fermentativas (anaeróbias) por unidade de massa de material orgânico (ANDREOLI, 2006 (2)).

2.0 DESTINO DO LODO DE ESGOTO

Numa estação de tratamento de esgoto, os resíduos sólidos que devem ser dispostos adequadamente são provenientes do sistema de gradeamento, dos desarenadores, dos reatores (escumas formadas e lodo biológico) e do tratamento da fase sólida (lodo estabilizado dos reatores ou digestores de lodo).

O consumo energético no setor de saneamento ambiental, e especificamente em estações de tratamento de esgotos (ETE), tende a apresentar um crescimento nos próximos anos, devido ao crescimento populacional e aos requerimentos ambientais, que serão cada vez mais rígidos.

Na cidade de Uberlândia o DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto), é a empresa responsável pelo processo de saneamento, e destina o lodo de esgoto gerado para o aterro sanitário local, onde o resíduo é simplesmente descartado, não havendo sua reutilização (figura 4).

A tabela 6 abaixo apresenta uma avaliação dos custos de diferentes alternativas de disposição final dos lodos de esgoto.

Tabela 6 Custos de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto.

Alternativas de disposição final	Custo (US\$/t)
Aterros sanitários	20 a 60
Incineração	55 a 250
Reciclagem agrícola	20 a 125

Fonte: MEDEIROS, 2006.

Segundo estudo efetuado pelo Ministério do Meio Ambiente no estado de Minas Gerais, para mitigação de uma área inadequada de disposição de resíduos serão necessários

investimentos, na média da ordem de US\$ 13,64 / habitante, o que nos dá uma idéia do custo de implantação de um aterro sanitário (ALVES, 2010).



Figura 4 Lodo de esgoto proveniente da ETE Uberabinha disposto no aterro sanitário

Fonte: autor

2.1 OPERAÇÕES E PROCESSOS UNITÁRIOS DE TRATAMENTO DO LODO

O tratamento do lodo, após a sua geração inclui uma ou mais das seguintes etapas (VIEIRA, *et al.*, 2010):

- Adensamento: redução de umidade (redução de volume);
- Estabilização: redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- Condicionamento: preparação para desidratação (principalmente mecânica);
- Desidratação: redução adicional de umidade (redução de volume);
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

2.2 ADENSAMENTO

O adensamento tem por objetivo aumentar a concentração de sólidos no lodo, reduzindo a água do resíduo através de meios físicos. Os tipos de adensamento mais comuns são: por gravidade, flotação com ar dissolvido, centrífuga, adensador de esteira, tambor rotativo (VIEIRA, *et al.*, 2010).

2.3 ESTABILIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO

O objetivo da estabilização do lodo é atenuar duas características indesejáveis desse resíduo: odor e conteúdo de patógenos. O lodo produzido por Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) deve ser estabilizado, sendo que este processo pode ser definido de forma articulada com o desaguamento, higienização e destinação final do produto.

Para estabilizar o lodo gerado nas ETEs aplicam-se quase exclusivamente métodos biológicos: digestão anaeróbia ou, em poucos casos, a digestão aeróbia (ANDREOLI, 2006(1)).

O lodo resultante dos sistemas de tratamento biológico de esgotos é constituído em boa parte por bactérias heterotróficas vivas, cuja quantidade irá determinar a eficiência dos processos biológicos.

O lodo é, portanto, matéria-prima para os processos de tratamento biológico de esgotos e seu excesso passa a ser considerado um resíduo (ANDREOLI *et al.*, 2001(1)).

No lodo adequadamente estabilizado, pouca ou nenhuma decomposição ocorre e, conseqüentemente, os odores não são produzidos. O ajuste do pH pode causar liberação de gás; à pH alto ($> 10,5$) o gás amônia é emitido, e a pH baixo ($< 6,0$) é provável que haja a liberação de sulfeto de hidrogênio (CHAGAS, 2000).

2.4 A NATUREZA DO MATERIAL A SER SECO

Os lodos ou emulsões de natureza essencialmente orgânica se ajustam a um modelo de eliminação da umidade, uma vez que a natureza do material a ser seco, condiciona o sistema de secagem.

Em materiais de natureza orgânica, especialmente os higroscópicos como os lodos de ETE, a rede capilar é muito extensa e a água é difícil de remover porque está retida por

forças de adsorção e osmóticas (figura 5). Por isto estes materiais irão reter a água com maior intensidade que os inorgânicos.

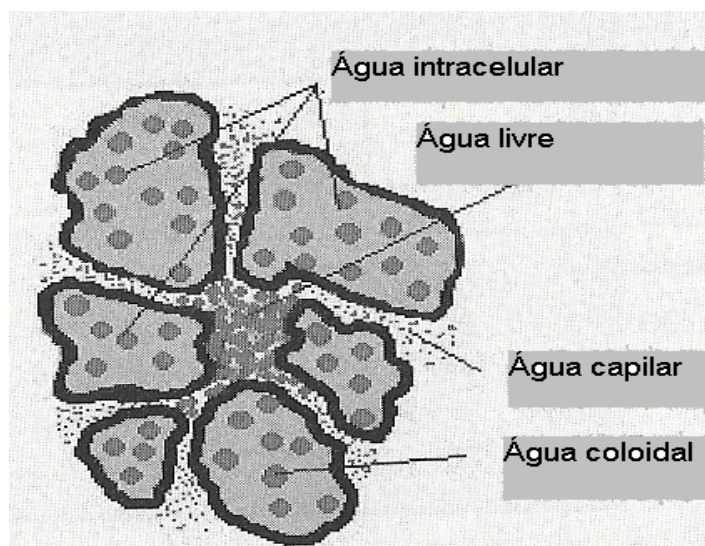


Figura 5 Micela de lodo orgânico

Fonte: CASTELLS, 2005.

Segundo ANDREOLI *et al* (2001 (2)), CASSINI (2003) é possível distinguir quatro classes de água no lodo, de acordo com a facilidade de separação:

- Água livre: a mais fácil de remover (CASTELLS, 2005), podendo ser removida por gravidade (adensamento, flotação). Representa a maior quantidade em lodos de esgoto.
- Água coloidal ou superficial: encontra-se adsorvida na superfície das partículas sólidas. Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de flocculante (SPAVIER, *et al* 2003).
- Água capilar: Mantém-se adsorvida à fase sólida por força capilar, distinguindo-se da água adsorvida pela necessidade de uma força maior para sua separação (ANDREOLI *et al*, 2001 (2)) . Precisa de temperatura para sua remoção (CASTELLS, 2005).
- Água intracelular: É a água de constituição da partícula. É parte da fase sólida e só pode ser removida através de forças térmicas que provoquem uma mudança no estado de agregação da água, isto é, através do congelamento ou evaporação, (SPAVIER, *et al* 2003) sendo muito difícil de remover (CASTELLS, 2005).

Essas definições são úteis na estimativa da quantidade de sólidos que pode ser obtida por desaguamento (SILVA, 2004).

Dessa forma, a capacidade de desaguamento do lodo está diretamente relacionada ao tipo de sólido e à forma como a água está ligada às partículas sólidas (BORGES *et al.*, 2009).

2.5 CONDICIONAMENTO DO LODO PARA DESAGUAMENTO

O condicionamento é um processo para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo, seja por meios físicos ou químicos.

O condicionamento de lodos neutraliza ou desestabiliza as forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão, imersos no líquido. Este processo de desestabilização permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, ou seja, os flocos (figura 6).

Em uma operação de desaguamento, consegue-se através do condicionamento, uma redução significativa da umidade do lodo gerado nas ETEs.

O método de condicionamento mais utilizado é o químico, e faz uso de produtos químicos inorgânicos ou orgânicos (ou a combinação de ambos). Os produtos químicos inorgânicos correntemente usados são os sais férricos, ferrosos e de alumínio e óxido ou hidróxido de cálcio, enquanto que os produtos químicos orgânicos incluem o extenso grupo de polieletrólitos orgânicos – polímeros que contém grupos ionizáveis, normalmente um ou mais que se repetem por unidade, que têm sido usados extensivamente no tratamento de água e esgoto.

Polieletrólitos catiônicos representam a grande maioria dos condicionantes químicos de natureza orgânica utilizados no desaguamento de lodos, pois a maioria dos lodos possui cargas elétricas negativas (SANTOS, 2003), conforme ilustrado na figura 6. O monômero utilizado normalmente para o condicionamento é a acrilamida (figura 7) a qual não apresenta carga elétrica.

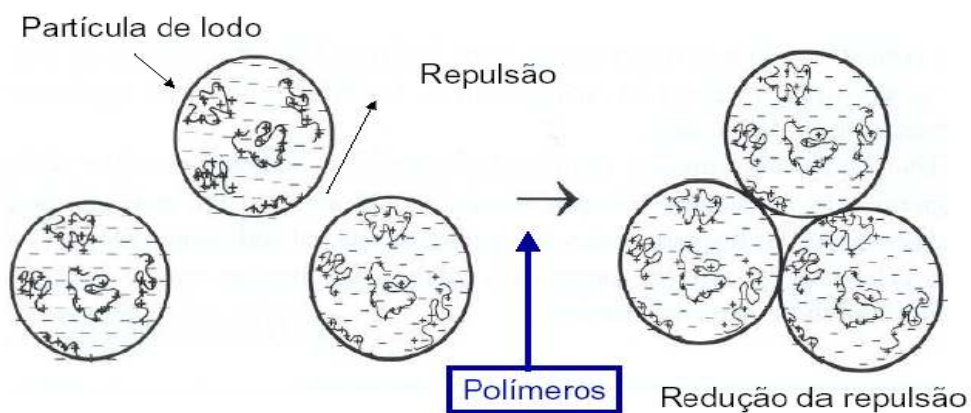


Figura 6 Mecanismo da formação do floco com uso de polieletrólito.

Fonte: REAMI, 2009.

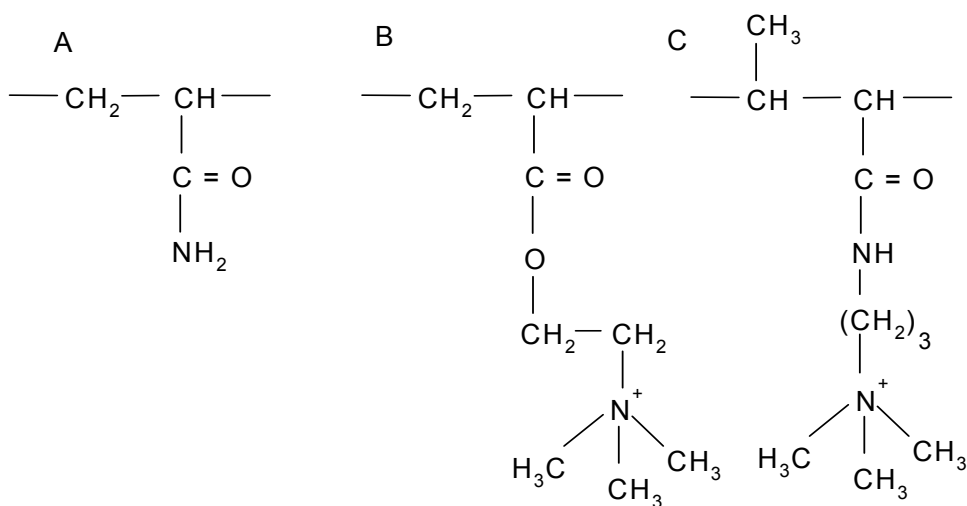


Figura 7 Estruturas químicas de monômeros geralmente usados para síntese de copolímeros catiônicos de acrilamida. A: Monômero de acrilamida. B: Monômero catiônico tipo éster quaternário de amônio. C: Monômero catiônico tipo amida quaternária de amônio.

Fonte: HUBBE, *et al.*, 2009.

Os polieletrólitos orgânicos são uma classe de polímeros, solúveis em água, bastante utilizados e importantes para floculação de lodos de esgoto. A quantidade de polieletrólito a ser utilizada depende das características do lodo a ser desaguado e dos processos mecânicos

envolvidos, podendo variar de 0,2 a 15 Kg/t de lodo (SANTOS, 2003). Devido a sua elevada concentração, os polieletrólitos devem ser submetidos à diluição com água antes de ser utilizado (ANDREOLI *et al.*, 2001 (1)).

A característica mais importante para comparação de desempenho é a combinação de peso molecular e carga da molécula do polímero. A carga é desenvolvida pelos grupos orgânicos ionizáveis distribuídos através dos diferentes sítios da molécula de polímero. Para proporcionar o condicionamento do lodo, estes sítios carregados devem manter suas atividades durante o processo. No caso dos polieletrólitos em pó a dissolução dos polímeros requer um sistema típico, considerando o pré-umedecimento do pó e o tempo de dissolução. Neste tempo as moléculas estendem-se e assumem um formato que lhes permite flocular o lodo (SANTOS, 2003).

A viscosidade de uma solução de polímeros depende da forma e do tamanho de sua molécula e da conformação que adota em solução (TARDELLI, 2010). A cadeia do polímero em uma conformação enovelada efetivamente ocupa um volume muito maior do que o número equivalente de unidades do monômero isolado.

Nos polieletrólitos a conformação enovelada dos polímeros pode ser expandida, devido a uma possível interação repulsiva de segmentos carregados, que depende dos efeitos de força iônica. Em meio de força iônica elevada, a repulsão entre os segmentos carregados é ‘blindada’ por íons em solução e assim a expansão do novelo não é tão grande. Em uma reduzida concentração salina a repulsão torna-se mais significativa e o novelo de polímero adota uma configuração mais expandida. Este conceito é ilustrado na figura 8. Este comportamento será importante para uso no desaguamento de lodos, permitindo uma redução significativa da sua umidade (BOLTO, *et al.*, 2007).



Figura 8 Expansão da cadeia do polieletrólito com a diminuição da força iônica.

Fonte: BOLTO *et al.*, 2007.

A característica de carga dos polímeros de condicionamento permite que eles sejam aniônicos (com cargas negativas), não-iônicos (carga resultante neutra) ou catiônicos (aqueles com cargas positivas).

A densidade de carga de um polímero varia de baixa a alta carga, e é uma medida da quantidade de sítios de uma cadeia, que possuem a carga associada ao polímero. Então para um polímero catiônico, todos os sítios carregados positivamente são passíveis de serem medidos. Os sítios remanescentes ou possuem carga neutra ou negativa (MIKI, 1998).

O peso molecular de um polímero corresponde ao comprimento da cadeia (inclusive as ramificações) que contém os sítios de carga. O peso molecular influencia outros fatores do polímero, tais como: solubilidade, viscosidade e densidade de carga. Os produtos normalmente encontrados no condicionamento de lodo podem ser categorizados quanto ao peso molecular em: baixo, médio, alto e muito alto (MIKI, 1998).

2.6 PRINCIPAIS PROCESSOS UTILIZADOS NA DESIDRATAÇÃO DE LODO

A baixa produção de lodo nas ETEs é um objetivo que deve-se perseguir, seja pela escolha do processo de tratamento (processos anaeróbios por exemplo, geram muito menor massa de lodo que processos clássicos aeróbios), seja pelo tipo e grau de desidratação adotados (unidades mecanizadas como os filtros prensa permitem alcançar até mais de 35% de teor de sólidos na torta seca, contra menos de 20% nos filtros de esteira, reduzindo sensivelmente o volume de lodo seco gerado) (JORDÃO, *et al.*, 2005).

Os lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos, após submetidos aos processos de estabilização, possuem um elevado teor de umidade, tornando inevitável sua desidratação, tendo em vista principalmente o transporte do lodo para destinação final (FERREIRA, *et al* 1999).

Uma pequena remoção de umidade do lodo, produz uma alta redução do seu volume inicial, como demonstra a fórmula simplificada:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{100 - H_2}{100 - H_1} \quad \text{equação 2}$$

onde

V_1 = volume de lodo com umidade H_1 ;

V_2 = volume de lodo com umidade H_2 .

A figura 9 mostra a variação do volume ocupado por uma amostra de lodo em função do seu teor de água. Pode-se observar pela curva que quando o teor de sólidos é muito baixo, um pequeno aumento deste teor implica em uma grande diminuição do volume total de água presente no lodo. Isto explica a redução do volume de 1 m³ de lodo com 95% de teor de água (5% de teor de sólidos) em função do teor de água, nesta mesma curva (JORDÃO, *et al.*, 2005).

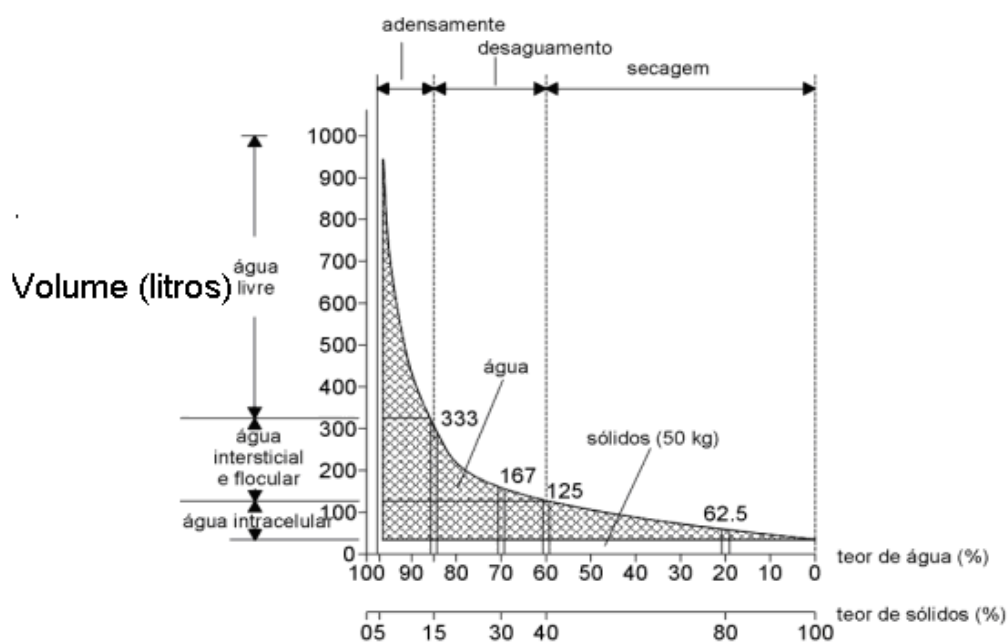


Figura 9 Redução do volume de lodo em função do seu teor de água.

Fonte: (FERREIRA, 1999).

Quando o lodo é desidratado de uma concentração de 2% de sólidos para 20% de sólidos, seu volume é reduzido em 90% (SILVA, 2004). Diminuindo-se os volumes a serem tratados, são diminuídos os custos de transporte e destino final.

A variação no teor de umidade do lodo de diferentes concessionárias responsáveis pelo tratamento de esgoto, está intrinsecamente ligada com o tipo de sistema de tratamento adotado na ETE, bem como da tecnologia empregada, pois a depender destes fatores, os teores de umidade variam bastante de uma estação para outra.

Dentre os processos de tratamento do lodo para remoção de umidade, usualmente empregados nas ETEs, podemos destacar os de desidratação natural que ocorrem em leitos de secagem e em lagoas de lodo, e os processos de desidratação mecanizada utilizando os filtros prensa de placas ou de esteira e as centrífugas.

Uma alternativa para a diminuição do peso e volume de lodo é a operação de secagem térmica. A mesma proporciona uma diminuição dos custos de transporte e disposição final, além de ser considerado um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos, e ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica presente no lodo, dois aspectos de fundamental importância quando o lodo seco vai ser utilizado na agricultura.

No caso do tratamento anaeróbio, o lodo poderá ser seco utilizando energia proveniente do biogás, produzido no próprio processo de digestão.

Processos de tratamento do lodo, utilizados para remoção de umidade na ETE Uberabinha, são: a desidratação em centrífugas e o desaguamento com geotêxtil.

As centrífugas constituem um sistema mecânico de desidratação preferido, por passar os lodos gerados em ETEs que têm porcentagem de sólidos da ordem de 4 % para 22-30 %, já que o consumo energético necessário é desprezível frente à demanda que teria um processo térmico (CASTELLS, 2005).

A centrifugação é um processo de separação sólido / líquido forçada pela ação de uma força centrípeta, sendo um processo de sedimentação decorrente da diferença de densidade entre uma partícula e o líquido que a circunda. Em uma centrífuga, a força centrífuga aplicada para separar o sólido da suspensão líquida é de 500 a 3000 vezes superior à força da gravidade (ANDREOLI *et al*, 2001 (2)).

A centrífuga, como a mostrada na figura 10, é uma máquina composta por um tambor cilíndrico-cônico (1) (CASTELLS, 2005), que ao girar desenvolve uma força de separação entre a fase líquida e a sólida, depositando, desta forma, o lodo ao redor da parede cilíndrica, onde ocorre a compactação deste, e por uma rosca transportadora de extração, (rosca sem fim) (2), que gira com velocidade diferente do tambor, graças a um redutor, provocando, assim, o transporte dos sólidos até a zona de descarga.

O condicionamento (preparação para desidratação) com o uso de polieletrólitos catiônicos é necessário na desidratação mecânica de lodos, com a utilização de centrífugas,

uma vez que desta forma partículas mais finas adquirem tamanho suficiente para serem capturadas.

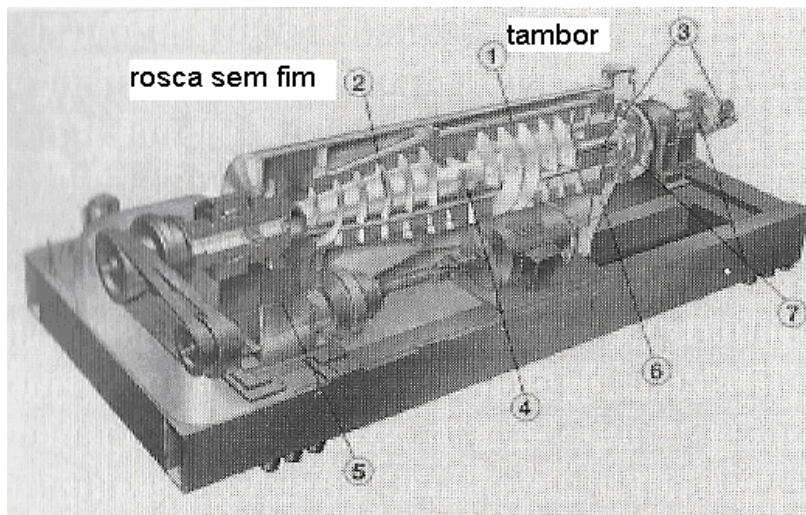


Figura 10 Centrífuga horizontal utilizada em desidratação.

Fonte: CASTELLS, 2005.

Tecnologia recente no campo do desaguamento de lodos de ETEs, cuja origem remete-se aos materiais utilizados na construção de diques de contenção em países baixos é o tubo de membrana geotêxtil.

Construído com membrana geotêxtil de alta resistência, este sistema suporta altas pressões na fase de enchimento e cuja superfície permite a drenagem da água contida no lodo condicionado.

A utilização deste sistema envolve três fases:

- Fase do confinamento: o lodo devidamente condicionado é bombeado para o interior do tubo;
- Fase de desaguamento: o lodo condicionado libera a água que passa através da membrana geotêxtil, enquanto as partículas sólidas ficam retidas no interior do tubo, sendo este processo repetido até o completo preenchimento do mesmo;
- Fase de consolidação: após o preenchimento total do tubo com lodo condicionado, o tubo é deixado em repouso por meses, aumentando o teor de sólidos do lodo no interior do tubo.

Finalizado o processo de consolidação (preenchimento e repouso), procede-se a abertura da membrana e retirada do lodo com uso de máquina retroescavadeira do tipo *Poclayn* quando o sistema for de grandes dimensões.

De acordo com PEDROZA *et al*, (2010) o teor de umidade do lodo depende do tipo de estabilização e desaguamento utilizados (tabela 7).

Tabela 7 Teor de sólidos no resíduo do tratamento de esgoto de acordo com o tipo de estabilização e equipamento / processo utilizado para o deságue.

Tipo de estabilização	Desaguamento	Teor de sólidos no resíduo (%)
Digestão Anaeróbia	Filtro prensa de placas	30 a 40
	Filtro prensa de esteiras	16 a 25
	Centrífugas	25 a 30
	Leitos de secagem	20 a 30
Digestão Aeróbia	Filtro prensa de placas	25 a 35
	Filtro prensa de esteiras	13 a 18
	Centrífugas	20 a 25
	Leitos de secagem	25 a 30

Fonte: ALÉM SOBRINHO apud PEDROZA *et al* (2010)

2.7 PODER CALORÍFICO DE UM COMBUSTÍVEL

Poder calorífico de um combustível é o termo utilizado para representar a sua entalpia padrão de combustão, sendo uma medida do calor que pode ser liberado pela combustão completa desse combustível, por unidade de massa (Kcal/kg) para combustíveis sólidos e líquidos, ou de volume (Kcal/m³), para combustíveis gasosos, e nas condições normais de temperatura e pressão.

Podemos definir dois tipos de poder calorífico: o poder calorífico superior (PCS), que é a quantidade de energia liberada na queima por combustão completa de uma unidade de massa da amostra, a volume constante em uma atmosfera de oxigênio, assumindo que os produtos finais da combustão consistam em O₂, CO₂, SO₂ e N₂ ambos na fase gasosa,

juntamente com a água, contida na amostra e gerada a partir do hidrogênio combinado, na forma líquida. Este poder calorífico pode ser determinado experimentalmente em laboratório através de calorimetria, em uma bomba calorimétrica (RIBEIRO, 2002).

Uma bomba calorimétrica é um recipiente de paredes metálicas resistentes, que pode ser fechado hermeticamente, e onde se introduz uma amostra de massa conhecida da substância, misturada com oxigênio a uma pressão de 30 bar, depois de eliminar o ar, para garantir a total combustão da amostra.

O poder calorífico inferior (PCI) pode ser calculado a partir do PCS assumindo que a água nos produtos permanece na forma de vapor (REGUEIRA *et.al*, 2004), ou seja, descontamos do poder calorífico superior o calor latente liberado pela condensação e resfriamento de toda água presente nos produtos da combustão, incluindo a água previamente presente no combustível como umidade (HILSDORF, 2004).

Em síntese, o poder calorífico superior é obtido quando se considera que toda a água nos produtos da combustão esteja no estado líquido, e o poder calorífico inferior quando for considerado que toda a água nos produtos esteja no estado de vapor (HILSDORF, 2004).

A principal finalidade de se determinar o poder calorífico dos combustíveis é avaliar a potência calorífica destes para a geração de energia a partir do processo de combustão (GOMIDE, 1984). Assim para um bom rendimento térmico na combustão, o combustível deve possuir uma elevada quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, e alto poder calorífico (BORGES *et al.*, 2008).

Normalmente o poder calorífico é expresso, para combustíveis sólidos e líquidos em KJ/kg e para combustíveis gasosos em KJ/m³ em unidades métricas (HILSDORF, 2004).

No que se diz respeito ao resíduo sólido do tratamento de esgoto conhecido por lodo, os seus elementos combustíveis são carbono, enxofre e hidrogênio, que existem sob a forma de gordura, carboidratos e proteínas. Os produtos da combustão completa do lodo são: vapor d'água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e cinza inerte (SANTOS, 2003).

As tabelas 8 e 9 abaixo apresentam a composição elementar típica de alguns tipos de biomassa, além de seus poderes caloríficos.

Tabela 8 Composição Elementar típica e poder calorífico de tipos representativos de biomassa, carvão e turfa.

	Celulose	Pinheiro	Algas Gigantes marrons	Aguapé	Resíduos de animais (exterco)	RDF*	Lodo	Turfa	Betume
C (% peso)	44,44	51,8	27,65	41,1	35,1	41,2	43,75	52,8	69,0
H (% peso)	6,22	6,3	3,73	5,29	5,3	5,5	6,24	5,45	5,4
O (% peso)	49,34	41,3	28,16	28,84	33,2	38,7	19,35	31,24	14,3
N (% peso)	-	0,1	1,22	1,96	2,5	0,5	3,16	2,54	1,6
S (% peso)	-	0	0,34	0,41	0,4	0,2	0,97	0,23	1,0
Cinzas (% peso)	-	0,5	38,9	22,4	23,5	13,9	26,53	7,74	8,7
Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹) base seca	17,51	21,24	10,01	16,00	13,37	12,67	19,86	20,79	28,28

*Combustível Derivado do Lixo.

Fonte: SHINYA *et al.* (2008).

Tabela 9 Composição centesimal e teor de cinzas de alguns combustíveis selecionados.

	Casca de Amêndoa	Resíduos Florestais	Serragem	Resíduos de Madeira	Salgueiro	Madeira de demolição	Palha	MBM*
C (% peso)	49,6	51,0	51,0	45,99	44,7	44,5	36,4	55,67
H (% peso)	6,4	7,9	7,9	5,67	5,7	5,6	4,8	8,03
O (% peso)	43,4	40,8	40,8	35,44	48,21	46,52	37,03	29,1
N (% peso)	0,6	0,3	0,3	3,82	0,2	1,1	0,9	7,15
S (% peso)	0	0	0	0,05	0,03	0,09	0,29	0,05
Cinzas (% peso)	3,36	1,2	0,44	8,76	1,14	1,92	17,74	10,38
Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹) base seca	26,21	28,82	28,82	23,91	16,97	17,87	14,88	30,64

*Farinha de carne e osso.

Fonte: SKODRAS *et al* (2006).

Portanto, o conteúdo de energia química ou poder calorífico é de curso um parâmetro importante quando se considera a energia e aplicação combustível não só do lodo de esgoto, mas também para diferentes espécies e tipos de biomassa com elevada porcentagem de carbono orgânico.

A tabela 10 apresenta o poder calorífico superior e inferior de combustíveis consagrados.

Tabela 10 Poder calorífico de combustíveis em MJ/kg.

Combustível	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior
Metano	55,5	50,0
Gás Natural	50	45,0
Gasolina	47,3	44,0
Diesel (leve)	44,8	42,5
Diesel (pesado)	43,8	41,4
Gás de Refinaria	42,3	38,6
Etanol	29,7	26,9
Carvão Vegetal	29,7	n/d
Metanol	22,7	20,0
Madeira Seca	19,8 a 20,9	n/d
Madeira (25 a 30 % de umidade)	14,6	n/d

Fonte: OLIVEIRA *et al* (2009)

O destino final do lodo produzido na ETE Uberabinha, maior estação de tratamento de esgotos de Uberlândia é o aterro sanitário. Uma alternativa para evitar a disposição deste lodo de esgoto em aterros, seria o aproveitamento do seu potencial energético, potencialidade esta que precisa ser inicialmente avaliada em conjunto com características físico-químicas do material, direcionando ou não o uso desta biomassa em processos de geração de calor, da mesma forma que ocorre na combustão de outras biomassas como o bagaço de cana-de-açúcar e derivados da madeira, obtendo-se assim vantagens ambientais do problema crescente de geração de resíduos que a humanidade enfrenta.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial energético do lodo de esgoto anaeróbio da cidade de Uberlândia-MG, gerado na ETE Uberabinha, de modo a favorecer o aproveitamento deste resíduo como biomassa combustível na geração de energia.

3.2 Objetivos Específicos

- Caracterização do lodo proveniente de reatores anaeróbios, do ponto de vista de suas análises térmicas (DSC, DTA e TG), sob condições de pirólise;
- Caracterização do lodo através da espectroscopia de infravermelho e quanto aos teores de carbono;
- Obtenção do poder calorífico do lodo de esgoto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ORIGEM DO LODO DE ESGOTO

Foram empregadas neste estudo, amostras de lodo desidratado dos reatores anaeróbios, provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Uberabinha, localizada no município de Uberlândia-MG e operada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

4.2 A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)

A estação de tratamento de esgotos domésticos - ETE Uberabinha, em Uberlândia-MG, gerenciada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) é composta por gradeamento e desarenador (tratamento preliminar), reatores anaeróbicos de fluxo ascendente (RAFA), sistema de flotação por ar-dissolvido (coagulação-flotação), sistema de centrífugas e geotêxtil, ambos para o desaguamento do lodo gerado no processo sendo estimada uma produção mensal de 264,23 toneladas de lodo desidratado por mês, o que está de acordo com o apresentado por AISSE *et al.* (1999), que estima uma taxa de produção média de lodo gerado em reatores do tipo RAFA de $16 \text{ g STS hab}^{-1}\text{d}^{-1}$. O fluxograma do processo é apresentado na figura 11. Atualmente a estação tem capacidade para tratar 1927 litros/segundo e após ampliação, prevista para 2012, terá capacidade para tratar uma vazão média de 2334 litros/segundo. O sistema de geotêxtil é utilizado para desaguar o lodo da flotação, um lodo químico, que ocorre em sistemas de tratamento que incorporam uma etapa físico-química como a coagulação com cloreto férrico, floculação com polieletrólito catiônico seguida de flotação e cujo objetivo é dar o polimento final ao efluente, como os provenientes de reatores anaeróbios, caso este da ETE Uberabinha. No entanto este lodo não foi caracterizado neste trabalho.

O lodo proveniente dos reatores anaeróbios é condicionado com um polímero catiônico antes do desaguamento por centrifugação.

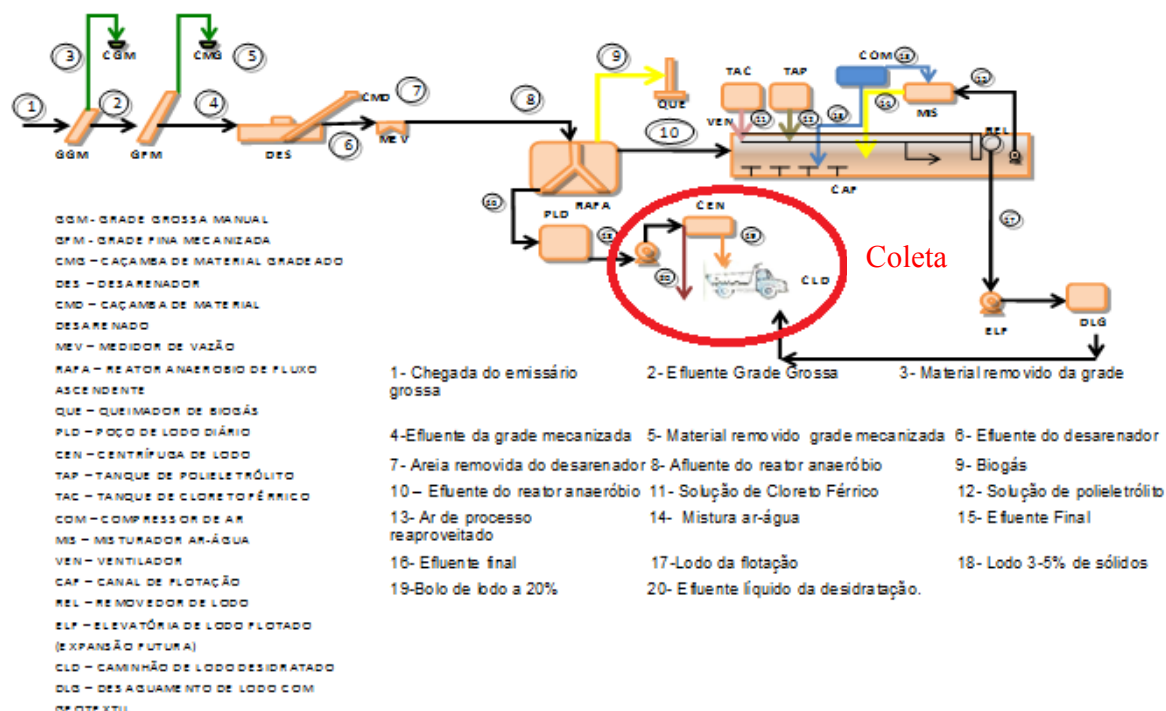


Figura 11 Fluxograma do processo de tratamento – ETE Uberabinha

Fonte: Autor

4.3 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras de lodo desidratado foram coletadas após a centrífuga (cerca de 100 g), na saída da rosca transportadora, sendo chamada de torta ou bolo de lodo a 20 %, conforme apresentado pela figura 12 abaixo e no ponto destacado no fluxograma da figura 11 acima, e antes de serem depositadas em caçambas, dispositivos de contenção deste resíduo gerado na ETE Uberabinha, antes da sua disposição final, que ocorre no aterro sanitário da cidade de Uberlândia. Para cada coleta, foi realizada uma amostragem de lodo.



Figura 12 Depósito do lodo desidratado em caçambas.

Fonte: Autor.

Antes da caracterização por análises térmicas e IR, a amostra foi esterilizada em autoclave vertical marca Prismatec, modelo CS a 121°C por 15 minutos, para evitar o risco de contaminação.

4.4 PARTE EXPERIMENTAL

4.4.1 TERMOGRAVIMETRIA (TG) E ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (DTA)

A perda de massa das amostras foi acompanhada por termogravimetria (TG), em um analisador termogravimétrico acoplado com um analisador térmico diferencial. Os termogramas e as curvas DTA foram obtidas em um equipamento marca Shimadzu, modelo DTG-60 H que consiste de uma termobalança, que permite a pesagem contínua das amostras em função da temperatura, no caso em estudo compreendeu o aquecimento da temperatura ambiente até 600°C, sobre atmosfera de nitrogênio com vazão constante de 50 mL min⁻¹, cadinho de alumina e com uma razão de aquecimento do equipamento de 10 °C min⁻¹. A massa da amostra de lodo foi de 4,95 mg.

4.4.2 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Para obtenção das curvas DSC, foi utilizado um calorímetro exploratório diferencial, marca TA, modelo DSC Q20, numa faixa de temperatura de 25-500 °C, usando

uma célula de alumina, com razão de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, em atmosfera de nitrogênio, com vazão de 50 mL min^{-1} . Para eliminar a água presente no material foi realizado um aquecimento prévio até 200°C , e em seguida procedeu-se normalmente, para obtenção da curva.

O equipamento deve ser previamente calibrado com índio (PF $156,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta H_{\text{fusão}} = 28,54\text{ J g}^{-1}$) ou outro padrão recomendado pelo fabricante.

4.4.3 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico superior (PCS) do lodo foi determinado em bomba calorimétrica digital IKA, modelo C 2000 basic com sistema de refrigeração da água IKA, modelo KV 600 digital. Para calibração da bomba calorimétrica foi utilizado ácido benzóico (padrão termoquímico) com massa de 1,03 g. A amostra sólida de lodo foi comprimida em pastilha, com o auxílio de uma prensa, obtendo-se para as duas pesagens uma massa média de 1,04 g. Assim como para o padrão, a amostra a ser analisada foi pesada (Balança Shimadzu – Modelo AW 220) em um cadinho e colocada no reator do calorímetro, que funcionou no modo isoperibol 25°C . O sistema foi pressurizado a 30 bar com oxigênio (99,95%) e refrigerado em banho termostático a 20°C . As medições foram realizadas em duplicata, e cálculos do PCS estão padronizados com as normas DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D1989, ASTM E711, adaptadas para lodo de esgoto.

4.4.4 DETERMINAÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT)

Para determinação da porcentagem do carbono orgânico total (COT) presente no lodo anaeróbio utilizou-se o equipamento marca Shimadzu e compartimento de amostra modelo SOLID SAMPLE MODULE SSM – 5000 A, e uma quantidade de amostra de 20,0 mg. O COT é obtido por diferença dos teores obtidos para carbono total (temperatura programada 900°C) e carbono inorgânico (temperatura programada 200°C). A concentração de carbono pode ser estimada convertendo-se o carbono presente em dióxido de carbono. Ou seja, através desta análise, a matéria orgânica contendo carbono é oxidada a dióxido de carbono através do aquecimento da amostra, sendo este produto da combustão

conduzido pelo gás de arraste (O_2 ultra-puro 4.0) para detecção no infravermelho.

4.4.5 DETERMINAÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS (ST) SECOS, SÓLIDOS FIXOS (SF) E VOLÁTEIS (SV)

O teor de sólidos totais foi obtido através da secagem do material em estufa à temperatura de $105^{\circ}C$ por um período de 16 horas. Para o teor de sólidos fixos e voláteis o lodo foi calcinado à temperatura de $550^{\circ}C$ por uma hora, conforme APHA (2005).

Nas determinações utilizou-se uma estufa de secagem (Nova Ética) modelo 400/4 ND, uma mufla (Hydrosan) modelo (HY-200F/DM) e uma balança analítica (GEHAKA) modelo AG 200 para realização do procedimento de acordo com o método 2540 G, descrito em APHA (2005).

4.4.6 INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURRIER (IVTF)

Os espectros de infravermelho da amostra de lodo anaeróbio e resíduo da bomba calorimétrica foram obtidos em um equipamento IR Prestige-21 FTIR Spectrophotometer (Shimadzu) na região entre 4000 e 400 cm^{-1} (infravermelho médio). A amostra foi preparada pela mistura do material com KBr em uma proporção de 1:100 (m/m). Para obtenção dos espectros foram realizadas 32 varreduras com uma resolução de 4 cm^{-1} .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE TÉRMICA

A Figura 13 apresenta os termogramas de TGA e DTA para o lodo UASB, no qual identificam-se três regiões distintas.

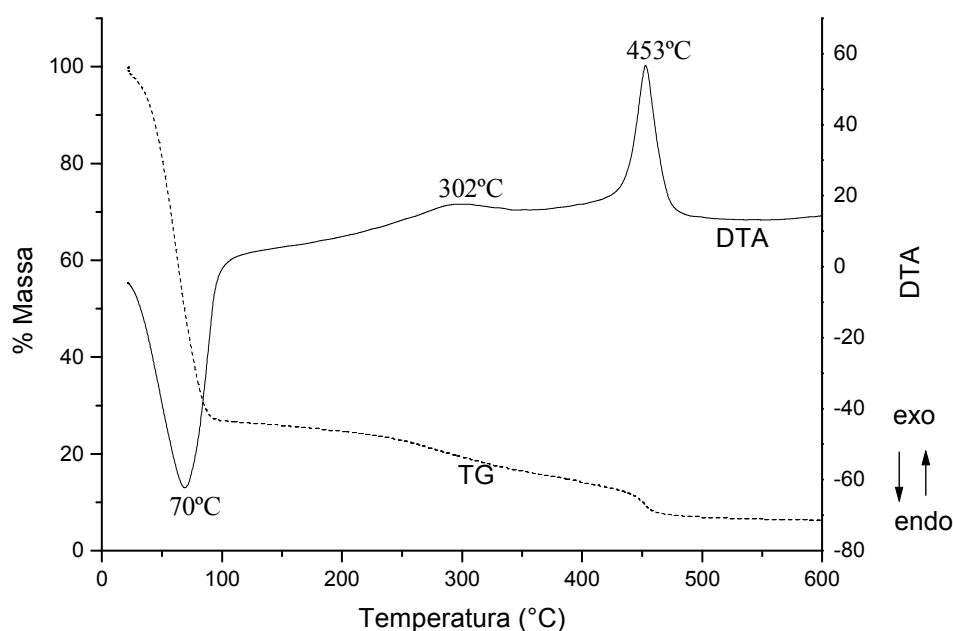


Figura 13 Curvas TG-DTA simultâneas do lodo anaeróbio desaguado.

Como a amostra de lodo não foi inicialmente seca, verificou-se uma perda de massa de 72 % na curva de TGA com uma endoterma correspondente por volta de 70°C, que é devida à liberação de água do material, vista na curva DTA.

De acordo com FRANCIOSO *et al.* (2009), a decomposição térmica de componentes termolábeis da matéria orgânica (proteínas e grupos carboxila) produz reações exotérmicas bastante significativas em aproximadamente 300°C, enquanto reações exotérmicas em temperaturas mais elevadas (~ 450°C) são originadas pela decomposição de carbonos refratários, tais como anéis aromáticos, estruturas N-alquila de cadeia longa e cadeias alifáticas saturadas. Diferentemente da curva DTA do lodo metanogênico estudado

por este autor, a curva DTA do lodo anaeróbio do nosso trabalho apresentou uma reação exotérmica acentuada em 453°C com perda de massa 10 %, e uma reação exotérmica menos acentuada em 302°C, perdendo cerca de 11 % em massa. Estes dois picos exotérmicos na curva DTA da amostra de lodo anaeróbio mostrados na figura 13, diferiram do dado experimental apresentado por FRANCIOSO *et al.* (2009), pelo fato da digestão e decantação do lodo proveniente do UASB tomar lugar em um único reator, com as fases acetogênicas e metanogênicas, e não com as duas fases em reatores separados, como ocorreu na caracterização térmica apresentada pelos autores citados.

A seguir (figura 14) é apresentada a curva obtida no DSC para o lodo anaeróbio, onde verificamos os processos de decomposição, com as respectivas entalpias.

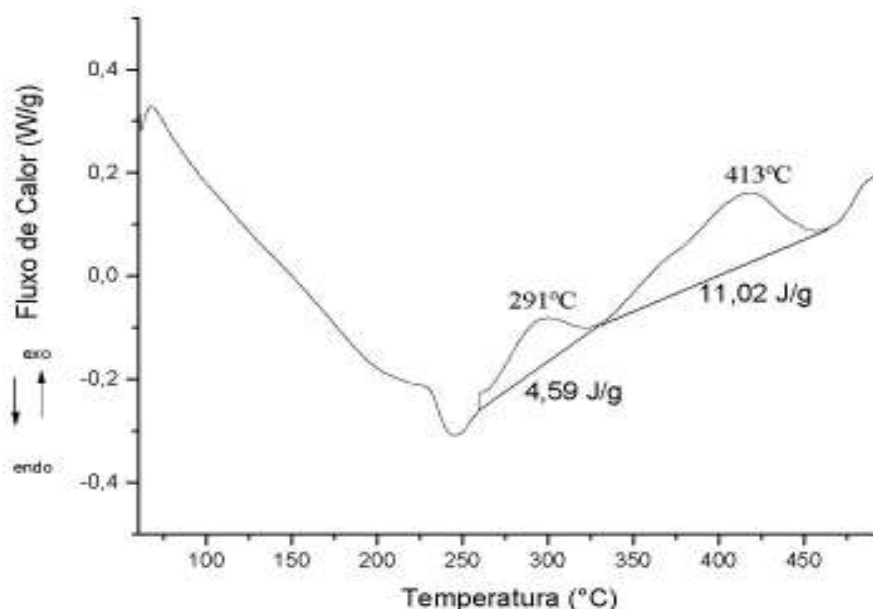


Figura 14 Curva DSC para o lodo anaeróbio desaguado.

A presente curva demonstra um primeiro evento com um ΔH exotérmico de 4,59 J.g⁻¹ e uma temperatura de transição de 291°C, seguido por um segundo evento exotérmico ($\Delta H = 11,02$ J.g⁻¹) com temperatura de pico em 413°C. A ausência de evento térmico na curva de DSC com característica endotérmica próximo a 100°C indicou que não houve perda de umidade na amostra, devido à realização da etapa de pré-aquecimento da mesma, no equipamento de DSC, para eliminar a água, comprovando a atribuição do pico em 70°C,

mostrado na curva DTA. A presença de água dificulta a observação dos eventos exotérmicos, já que a mesma interage fortemente com as substâncias no lodo. Tais resultados corroboram aqueles de TG/DTA demonstrando que o valor de entalpia relacionado com a segunda exoterma é 2,4 vezes maior do que aquele da primeira exoterma.

5.2 RESULTADOS DE MEDIDA CALORIMÉTRICA E TEORES DE CARBONO

A tabela 11 abaixo apresenta os resultados obtidos de carbono total, carbono orgânico total e poder calorífico do lodo desidratado da ETE Uberabinha.

Tabela 11 Análise dos teores de carbono e poder calorífico.

Material amostrado		Torta de lodo	
Condicionante		Polímero Catiônico	
Análises de Carbono		Ano	
		2010	2011
Carbono Total	CT	32,53 %	30,98 %
Carbono Orgânico Total	COT	32,5 %	30,94 %
Medida Calorimétrica		Ano	
		2011	
Poder Calorífico Superior	PCS	$16,2 \pm 0,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$	

Obs.: Resíduo proveniente da desidratação em centrífugas na ETE Uberabinha.

O valor médio das duas medidas de poder calorífico do lodo de esgoto da ETE Uberabinha, determinado em bomba calorimétrica é de $16,2 \pm 0,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$ em base seca. De acordo com DWECK *et al* (2006), resultados de poder calorífico superior (PCS) com valores de 9,5 e $15,4 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e 16,77, 16,56 e $13,34 \text{ MJ.kg}^{-1}$ tem sido relatados para lodo de esgoto, embora afirme-se que o poder calorífico dependa da origem específica e da composição dos mesmos. Este mesmo autor encontrou utilizando um lodo de esgoto do município de Barueri-SP, o valor de PCS igual a $18,6 \pm 0,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Segundo SPLIETHOFF (2010) a variação no valor do poder calorífico do lodo de diferentes estações

de tratamento de esgoto e em uma mesma planta em diferentes épocas, está em torno de $\pm 1 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Segundo ANDREOLI *et al* (2001 (2)), os digestores anaeróbios, destinados ao tratamento de lodos com elevada proporção de matéria orgânica instável, produzem lodos digeridos com conteúdo de energia compreendido entre 6 e 13 MJ.kg^{-1} de sólidos totais (ST). Considerando, desta forma, o poder calorífico para o lodo de digestores como sendo 13 MJ.kg^{-1} , observa-se que o valor obtido em nosso resultado é 24 % superior ao apresentado. A origem das diferenças observadas pode estar no fato de que os dados apresentados serem relativos a lodos provenientes de digestores anaeróbios, destinados apenas a estabilização do resíduo sólido, diferentemente dos lodos originados em sistemas de tratamento utilizando reatores UASB.

O poder calorífico de $16,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para o lodo anaeróbio gerado na ETE Uberabinha, é da mesma ordem de grandeza do potencial energético de biomassas como a madeira úmida (10 a 20 % de umidade) cujo valor varia de 14 a 17 MJ.kg^{-1} CAMPREGHER (2005). Desta forma é possível formar briquetes do lodo seco micro-granulado para encaminhar para caldeiras comuns de biomassa. Também quando comparada com outra biomassa utilizada na geração de energia tal como o bagaço de cana em briquete ($\text{PCS} = 14,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$), o lodo seco apresentou maior poder calorífico, com a possibilidade de um melhor desempenho quando do seu uso como combustível (BORGES, 2008).

Para DOMÍNGUEZ, *et al* (2004) alguns combustíveis convencionais e não convencionais, tais como carvão, papel, madeira ou licor negro mostram poderes caloríficos similares aos apresentados por lodos de esgoto secos. Isto sugere que estes resíduos poderiam ser utilizados como combustíveis.

Vale ressaltar que uma ampliação na obtenção de resultados do poder calorífico, para o lodo desidratado da ETE Uberabinha, permitiria a análise de uma possível variação na composição dos lodos devido a alterações nos sistemas de tratamentos de efluentes e até mesmo ocasionadas pelas estações do ano, as quais indicariam, caso ocorresse influência, variações do poder calorífico do lodo.

Apesar de não ter sido realizada uma avaliação temporal do poder calorífico, o resultado do mesmo encontra-se de acordo com os valores referenciados na literatura para

lodo de esgoto (ALMEIDA, 2007), (ANDREOLI *et al* 2001), (DWECK *et al* 2006). A mesma literatura não menciona que os resultados apresentados e obtidos através de análises calorimétricas de lodo, teriam sido gerados por caracterizações de lodos obtidos ao longo de um considerável período de tempo na Estação de Tratamento em estudo, representando o resultado médio, reforçando a idéia do poder calorífico tratar-se de uma característica do lodo em estudo, relacionada com o tipo de lodo (municipal, industrial, misto), bem como a forma de tratamento que o gerou, independentemente da época do ano.

Observou-se ainda, na determinação do poder calorífico, após combustão do material junto ao reator que continha a amostra, formação de um resíduo avermelhado, provavelmente resultante da matéria mineral contida no lodo.

É possível destacar o maior teor de carbono orgânico da amostra de lodo digerido e desidratado proveniente de reator UASB, comprovando o conteúdo predominantemente orgânico do resíduo, o que contribuiu para obtenção de um considerável valor de poder calorífico, também apresentado na tabela 11. Apesar da sua natureza heterogênea, a composição do lodo de esgoto é atribuída principalmente à característica essencialmente orgânica das substâncias componentes.

O lodo da ETE Uberabinha apresenta carbono quase que completamente na forma orgânica, aproximadamente 99,9 % do conteúdo total de C, sendo assim uma fonte de energia, do ponto de vista químico. De acordo com DOMÍNGUEZ, *et al* (2004), quando comparamos diferentes lodos de esgoto, terá maior poder calorífico o lodo que apresentar maior teor de carbono e menor teor de cinzas. Além disso, de acordo com LIBÂNIO (2002) o lodo assim como amostras essencialmente orgânicas que são os solos orgânicos e os compostos (provenientes da compostagem), devido à massa de inertes ser desprezível, vale a consideração que a % carbono total = % carbono orgânico total.

Segundo CORREIA (2009), o carbono orgânico é derivado naturalmente da decomposição de plantas e animais, e está presente na massa seca do lodo de esgoto em concentrações que variam de 18 – 50 %, estando, o valor encontrado nas amostras de lodo do presente estudo, de acordo com a faixa citada.

5.3 TEOR DE SÓLIDOS

O sistema de desidratação por centrífugas, utilizado na ETE Uberabinha, converte o lodo dos reatores com uma concentração de sólidos em torno de 4,0% para 20% de sólidos totais. Tem-se assim uma amostra de lodo desidratado com um teor de sólidos de 20%, sendo (13% de sólidos voláteis e 7% de sólidos fixos).

O percentual médio de sólidos voláteis com relação aos sólidos totais (SV/ST) encontrado no lodo bruto foi de 65%, de onde se conclui que o lodo estava digerido, comparando-se com o intervalo de 60 a 65%, apresentado por SANT'ANNA (2002). Esta amostra apresenta, portanto, uma porção biodegradável significativa de 65%.

Segundo DOMÍNGUEZ, *et al* (2004), as características químicas apresentadas pelos lodos secos de seu trabalho são devidas a origem dos lodos. Igualmente a um lodo utilizado por este autor e que foi condicionado com polieletrólito orgânico, o lodo aqui caracterizado mostrou maior conteúdo em matérias voláteis e menor teor de cinzas (35%).

5.4 ESPECTRO DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO

Os espectros de infravermelho foram obtidos com a finalidade de tirar informações sobre a composição de grupos funcionais, do lodo anaeróbico desidratado da ETE Uberabinha.

A Figura 15 mostra o espectro de absorção na região do infravermelho da amostra de lodo anaeróbio gerado na ETE Uberabinha.

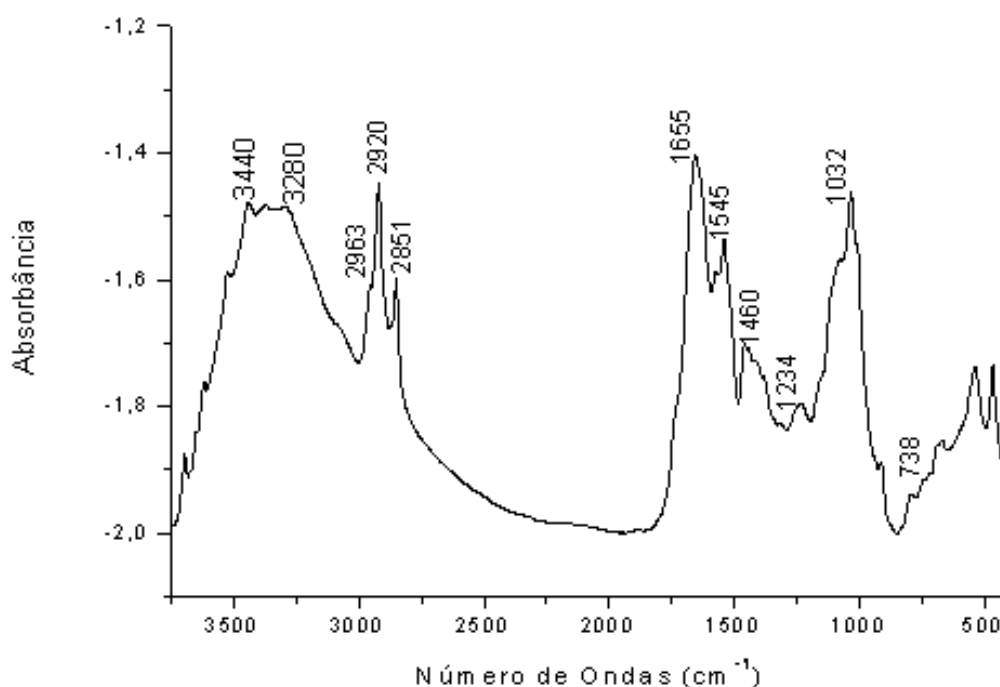


Figura 15 Espectro de Infravermelho para o lodo anaeróbico desidratado.

Analisando o espectro de infravermelho para a amostra de lodo, observamos que há vários picos de absorção na região entre 3600 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} sendo a região entre 3400 e 3000 cm^{-1} atribuída à vibração de estiramento de OH presente em ácidos carboxílicos e álcoois (FRANCIOSO *et al*, 2009). Também, nessa mesma região, uma banda centrada em torno de 3280 cm^{-1} é atribuída ao estiramento N-H de compostos orgânicos como as aminas (FAUSTINO, 2007). Estes compostos ainda apresentam bandas características em 1545 cm^{-1} referente à deformação angular de N-H e em 1655 cm^{-1} referente à vibração C=O, conhecida como “banda de amida I” (DOMÍNGUEZ, *et al* 2004).

Em 3040 cm^{-1} , observa-se um pequeno ombro que segundo FRANCIOSO *et al* (2009) é atribuído a vibração de estiramento C-H para cis-alceno.

Outras bandas de absorção na região de 3000 a 2800 cm^{-1} foram atribuídas a cadeias de hidrocarbonetos (PINHEIRO, 2007) relativas à presença de material orgânico na amostra de lodo, como já apontado pela análise térmica. As bandas em 2963 cm^{-1} e 2920 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento assimétrico C-H de grupos metil e metileno, respectivamente. A banda em 2851 cm^{-1} relativa ao estiramento simétrico C-H de metileno

e 1460 cm^{-1} atribuída à deformação angular simétrica no plano de CH_2 (MONTECCHIO *et al*, 2006). A região próxima de 738 cm^{-1} é atribuída à vibração oscilação de CH_2 (BUENO, 1990).

A região entre 1170 e 1000 cm^{-1} , com uma banda intensa localizada por volta de 1032 cm^{-1} é atribuída a vibração OH de compostos minerais presentes no lodo (FRANCIOSO *et al*, 2009), mas carboidratos e silicatos também absorvem nesta região (AMIR, 2005) e (GRUBE, *et al* 2006).

Os resultados apresentados no espectro de infravermelho estão de acordo com FRANCIOSO *et al*, (2009), PINHEIRO (2007), FAUSTINO (2007), DOMÍNGUEZ, *et al* (2004) e MONTECCHIO *et al*, (2006) e corroboram as atribuições feitas para as duas exotermas principais que aparecem nos experimentos de DSC e TG/DTA. No entanto, em relação à exoterma que aparece em 453°C na curva DTA, podemos dizer que corresponde principalmente à presença de estruturas N-alquila de cadeia longa e cadeias alifáticas saturadas, presentes no estágio de decomposição de carbono refratário, já que no infravermelho não se constatou a presença de bandas características de anéis aromáticos.

A tabela 12 apresenta as principais atribuições para o lodo anaeróbio.

Tabela 12 Atribuições das principais bandas do espectro infravermelho do lodo anaeróbio

Número de onda (cm^{-1})	Atribuições
Banda 2920 – 2851	Deformação axial C-H em cadeias alifáticas.
Banda 1460	Deformação angular C-H em cadeias alifáticas.
Banda 1032	Deformação axial Si-O.
Banda 1545	Deformação angular de N-H.
Banda 1655	Deformação axial de C=O.
Banda 3040	Deformação axial de =C-H
Banda 3400-3000	Deformação axial de O-H e N-H.

O espectro mostrado na figura 16 foi obtido do resíduo da bomba calorimétrica, formado após combustão do lodo.

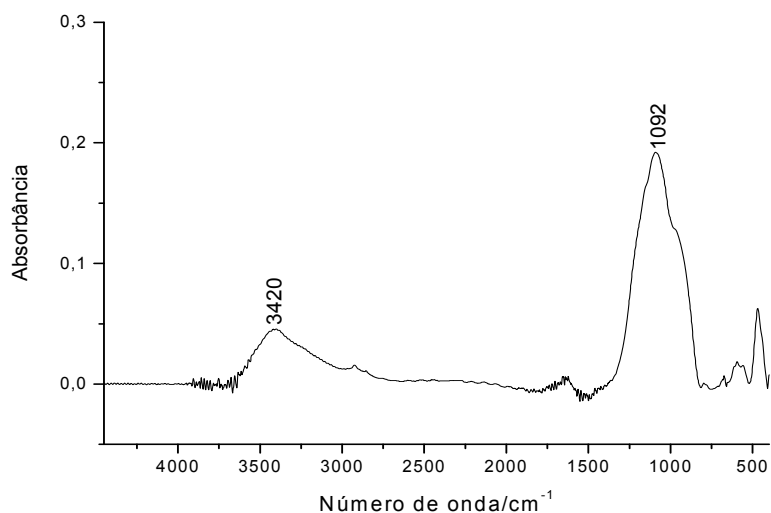


Figura 16 Infravermelho para resíduo gerado na bomba calorimétrica.

O espectro apresenta bandas provenientes da matéria mineral contida no lodo, uma vez que as vibrações de deformação axial de OH do grupo SiOH, ocorrem, segundo PRADO, *et al* (2005), na região de 3700 a 3000 cm^{-1} , enquanto que bandas intensas atribuídas a Si-O-Si de grupos siloxanos em 1100 a 920 cm^{-1} , confirmando a atribuição feita em 1032 cm^{-1} do espectro de infravermelho, para o lodo anaeróbico, considerando a combustão da matéria orgânica em bomba calorimétrica.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicaram que o lodo caracterizado apresenta uma porção biodegradável significativa de 65%, além de um poder calorífico superior de $16,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$, valor este que confere equivalência ao poder calorífico da madeira úmida. Este material também apresentou quase que sua totalidade em carbono orgânico total frente ao seu conteúdo de carbono total.

Os resultados da espectroscopia de infravermelho indicaram que os principais grupos orgânicos presentes no lodo de esgoto são as cadeias alifáticas, com a presença de duplas ligações, além dos grupos carbonila, hidroxila, ácido, Si-O-Si de grupos siloxanos e N-H de compostos orgânicos tais como as aminas.

A caracterização por análises térmicas mostrou uma exoterma acentuada por volta de 450°C característico da decomposição de carbonos refratários, e com conteúdo entálpico 2,4 vezes superior ao da exoterma localizada por volta de 300°C (onde ocorre a decomposição térmica de proteínas e grupos carboxila), ao contrário dos lodos encontrados na literatura.

Propõem-se o aproveitamento do potencial energético do lodo, evitando o seu envio ao aterro sanitário, uma vez que estes possuem uma vida útil, somado ao fato de que a disposição destes resíduos nestes locais aceleraria este tempo, agravando o problema da procura por locais permitidos para sua disposição, cada vez mais restritos nas grandes cidades.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar periodicamente o poder calorífico do lodo para verificar possíveis alterações do mesmo com o tempo e com o tratamento da fase sólida.
- Determinação do teor de matéria orgânica do lodo de esgoto anaeróbio.
- Determinação da composição elementar do lodo anaeróbio.

8 TRABALHO ORIUNDO DESSA DISSERTAÇÃO

- Artigo aceito na revista Termochimica Acta, novembro/2011.

*Manuscript Revised

ACCEPTED MANUSCRIPT

Thermal Analysis and FTIR Studies of sewage sludge produced in Treatment Plants. The case of sludge in the city of Uberlândia-MG, Brazil.

Jader de Oliveira Silva^{1, 2}, Guimes Rodrigues Filho^{1*}, Carla da Silva Meireles¹, Sabrina Dias Ribeiro¹, Júlia Graciele Vieira¹, Cleuzilene Vieira da Silva³, Daniel Alves Cerqueira⁴

¹ Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, CEP 38400-902, Cx. Postal 593, Uberlândia - Minas Gerais, Brazil.

² Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE)

³ Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia

⁴ Instituto de Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal da Bahia

*corresponding author: guimes.rodriguesfilho@gmail.com; guimes@ufu.br; telephone: +55 (34) 3239-4174 ext 201; Fax: +55 (34) 3239-4208.

Abstract

The operation of anaerobic reactors in Brazil creates a by-product, sewage sludge, for which adequate treatment is necessary to obtain a solid and stable material. The burning of sewage sludge may be an effective alternative for its management, and looking to enhance its energy potential, an environmentally friendly method of disposal is necessary. As the quantity of sludge generated has increased over the past few years, the physical chemical characterization of this waste is the first stage for its utilization as raw material. The material was characterized by thermal analyses (Thermogravimetry (TG)/ Differential Thermal Analysis (DTA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC)) and Infrared Analysis (FTIR) in order to determine the main organic groups present in sludge. The calorific power of the anaerobically digested sludge of Uberlândia-MG, Brazil was measured, and an energy content equal to 16.2 MJ kg⁻¹ was found, which is within the range of values reported in the literature.

Keywords: *UASB sludge, calorific power, thermal analyses, pyrolysis, organic material.*

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M.N., VAN HAANDEL, A.C., VON SPERLING, M., CAMPOS, J.R., COURACCI FILHO, B., SOBRINHO, P.A. Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: CAMPOS, J.R. (coord.). In: Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. ABES, Rio de Janeiro, RJ, 1999. cap. 11, p.271 – 299.

ALMEIDA, I. A. Demandas tecnológicas em meio ambiente e de empresas de saneamento. Inovatec 2007, São Paulo, 2007. Disponível em: http://www.feirainovatec.com.br/2007/downloads/dia3/sala03/lineu_andrade_de_almeida.pdf. Acesso em: 10 de nov.2011.

ALVES, J.W.S., GOUVELLO, C. (Coord.) Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. Relatório de Síntese Técnica – Resíduos. Banco Mundial, 2010. 112p.

AMIR, S. Contribution a la Valorisation de Boues de Stations D'épuration par Compostage: Devenir des Micropolluants Metalliques et Organiques et Bilan Humique du Compost. 2005. 341p. Thèse Doctorale Sciences Agronomiques – L'Institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse, 2005.

ANDREOLI, C.V., FERNANDES, F., SOUZA, S.G. Estabilização de Lodo de esgoto, cap 02. In: Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. Prosab, Curitiba-PR, 2001 (1).

ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos, cap 05. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, vol. 06. DESA – UFMG, SANEPAR. Belo Horizonte, MG, 2001, 484p (2).

ANDREOLI, C.V. Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Prosab, Rio de Janeiro: ABES, 2006 (2).

ANDREOLI, C.V., MIKI, M.K., SOBRINHO, P.A., VAN HAANDEL, A.C. Usos Alternativos de lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto. Projeto Prosab, ABES, Rio de Janeiro, 2006, 417p (1).

APHA, AWWA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th Edition. American Public Health Association. Washington, DC, USA, 2005.

BARBOSA, M.L.S. Estudo da biomassa de Reatores UASB Tratando Efluentes de Lacticínios. 2008. 133p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

BOLTO, B., GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment. Water Research,

41 (2007), 2301– 2324.

BORGES, E.S.M., GODINHO, V.M., BEJAR, D.O., CHERNICHARO, C.A.L. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. Eng Sanit Ambient, v.14 n.3, 2009, 337-346.

BORGES, F. Caracterização e Estudo da Potencialidade de Lodos de Efluentes Doméstico e Industrial como Combustível na Geração de Energia. 2008. 74p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos. Universidade da Região de Joinville. Joinville, 2008.

BORGES, F., SELLIN, N., MEDEIROS, S.H.W. Caracterização e Avaliação de Lodos de Efluentes Sanitário e Industrial como Biomassa na Geração de Energia. Ciência & Engenharia, v. 17, n. 1/2, p. 27 – 32, jan. – dez. 2008.

BUENO, A.W. Frequências características de grupos. In: Manual de Espectroscopia Vibracional. 1 Ed., São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda, 1990. p.209-260.

BURGER, L.W., HERSELMAN, J.E., MOODLEY, P. Guidelines for the Utilisation and Disposal of Wastewater sludge: Volume 5 - Thermal treatment and commercial products. Republic of South Africa: WRC Report, 2008. 79p.

CAMPREGHER, N. Estudo da Viabilidade de Incorporação do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel, Celulose e Aparas em Material Cerâmico. 2005. 73p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSC. Florianópolis, 2005.

CASSINI, A.S. Estudo de Processos Alternativos no Pré-Tratamento de Efluentes Provenientes da Produção de Isolados Protéicos. 2008. 179p. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

CASSINI, S.T. (Coord.) Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: Abes, Rima, 2003. 204p.

CASTELLS, X.E. Tratamiento y Valorización Energética de Residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Ediciones Díaz de Santos. España. 2005.

CHAGAS, W.F. Estudo de Patógenos e Metais em Lodo Digerido Bruto e Higienizado para fins Agrícolas, das Estações de Tratamento de Esgotos da Ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro. 2000. 89p. Dissertação de Mestrado em Ciências. Fundação Osvaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.

CHERNICHARO, C.A.L. (1997). Reatores Anaeróbios – Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias, vol. 5. DESA – UFMG. Belo Horizonte, MG. 180p.

COELHO, S.T., VELÁZQUEZ, S.M.S.G., PECORA, V. ABREU, F.C. Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente do Tratamento de Esgoto. XI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2006.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C.; VARKULYA JR. A.; PECORA, V. Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas – PUREFA. Trabalho apresentado no Congresso Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável (ICTR). São Paulo, 2003.

CORREIA, J.E. Caracterização Físico-Química e Microbiológica do Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Contorno. Feira de Santana, BA. 2009. 83p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

COSTA, J.C.G. Supervision of Transient Anaerobic Granular Sludge Process through Quantitative Image Analysis and Multivariate Statistical Techniques. 2008. 210p. Doutorado em Engenharia Química e Biológica. Universidade do Minho, Minho, 2008.

DOMÍNGUEZ, A., MENÉNDEZ, J.A., INGUANZO, M., PIS, J.J. Sewage sludge drying microwave energy and characterization by IRTF. *Afinidad*, Oviedo, 61(512), p.280-285, 2004.

DORES-SILVA, P.R., LANDGRAF, M.D., REZENDE, M.O.O. Acompanhamento Químico da Vermicompostagem de Lodo de Esgoto doméstico. *Quim. Nova*, Vol. XY, N°. 00, 1-6, 2011.

DUARTE, A.C.L. Incorporação de Lodo de Esgoto na massa cerâmica para fabricação de tijolos maciços: Uma alternativa para disposição final do resíduo. 2008. 111p. Dissertação de Mestrado. UFRN, Natal, 2008.

DWECK, J., MORAIS, L.C., MENESES, J.C., BUCHLER, P.M. Thermal analysis of municipal sludge waste combustion, *Mater. Sci. Forum*. 530 (2006) 740-746.

FAUSTINO, A.S. Estudos Físico-Químicos do Efluente produzido por Fossa Séptica Biodigestora e o Impacto do seu uso no solo. Dissertação de Mestrado em Química. 2007. 121p. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

FERREIRA, A.C., LARA, A.I., ANDREOLI, C.V., PEGORINI, E.S., IHLENFELD, R.G.K., FERNANDES, F. Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura. Sanepar/Prosab, Curitiba, 1999.

FORESTI, E; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. Van; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P.F.F. Fundamentos do tratamento anaeróbio, In: Campos, J.R. (Coord.) Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. p.29-52.

FRANCIOSO, O., RODRIGUEZ-ESTRADA, M.T., MONTECCHIO, D., SALOMONI, C., CAPUTO, A., PALENZONA, D. Chemical Characterization of municipal wastewater sludges produced by two-phase anaerobic digestion for biogas production. *J. Hazard. Mater.* 175 (2010) 740 - 746.

GOMIDE, R. Estequiometria Industrial. 3.ed..São Paulo: Edição do autor, 1984.

GRAAFF, M.S., TEMMINK, H., ZEEMAN, G., BUISMAN, C.J.N. Anaerobic Treatment of Concentrated Black Water in a UASB Reactor at a Short HRT. *Water*. 2010, 2, 101-119.

GRUBE, M., LIN, J.G., LEE, P.H., KOKOREVICH, S. Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy, *Geoderma*. 130 (2006) 324 - 333.

GUERRA, M.A.S.L. Avaliação de indicadores Biológicos e Físico-Químicos no Composto Orgânico Produzido a partir de resíduos da Indústria de Celulose. 2007. 70p. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.

HILSDORF, J. W., REITANO, M. F., Barros, N.D., BELLIBONI, C. Química Tecnológica, Cengage Learning, São Paulo, 2004.

HUBBE, M.A., NANKO, H., MCNEAL, M. Retention aid polymer interactions with cellulosic surfaces and suspensions: A Review. *BioResources*. 4(2), 2009. 850-906.

HUMBERTO, J. J. Combustão e Combustíveis: Apostila Química Tecnológica Geral; Florianópolis; UFSC; 2004; 45 p.

JORDÃO, E.P., PESSÔA, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 4ª edição. Rio de Janeiro, 2005, 932 p.

KHANAL, S.K. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and Applications in: Overview of Anaerobic Biotechnology. Blackwell Publishing, 2008, 1-27.

KHAN, M. R. , MCMAHON, M., DECANIO, S., J. Sewage Sludge: A Fascinating Feedstock for Clean Energy Texaco Research Development. Symposium on Clean Energy from Waste and Coal: Energy from Sewage Sludge, Biomass and Municipal Waste. Beacon, NY, 1991.

LAMAS, W.Q. Análise Termoeconômica de uma Mini-Estação de Tratamento de Esgoto com Auto-Suficiência Energética. 2007. 135p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. UNESP. Guaratinguetá, 2007.

LEITE, G.S., AFONSO, R.J.C.F., AQUINO, S.F. Caracterização de Contaminantes Presentes em Sistemas de Tratamento de Esgotos, por Cromatografia Líquida Acoplada à Espectrometria de Massas Tandem em Alta Resolução. *Quim. Nova*, Vol. 33, No. 3, 734-738, 2010.

LIBÂNIO, P.A.C. Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume. 2002. 156p. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente. UFMG. Belo Horizonte, 2002.

LIRA, A.C.S., GUEDES, M.C., SCHALCH, V. Reciclagem de lodo de esgoto em

plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. Eng. sanit. ambient. Vol.13 - Nº 2 - abr/jun 2008, 207-216.

MEDEIROS, S.A. Incorporação do lodo de tanque séptico como matéria-prima de uma mistura asfáltica. 2006. 85p. Dissertação de Mestrado. UFRN. Natal, 2006.

MENDES, D.H., PEREIRA, E.V., CARDOSO, S., JÚNIOR, E.G. Utilização do Biogás para a Secagem de Lodo e Geração de Energia Elétrica em uma Indústria Cervejeira. Revista Ciências Exatas – Universidade de Taubaté (UNITAU) – Brasil – Vol. 2, N. 2, 2007.

METCALF & EDDY. Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. Editorial Labor, S.A. –Barcelona- Primera edición, (1977). Traducción: Juan de Dios Trillo Monsoriu, Luis Virto Albert.

MIKI, M.K. Utilização de Polímeros para Condicionamento de Lodo de ETE para Desidratação em Filtro Prensa de Placas. 1998. 405p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

MONTECCHIO, D., FRANCIOSO, O., CARLETTI, P., PIZZEGHELLO, D., CHERSICH, S., PREVITALI, F., NARDI, S. Thermal Analysis (TG-DTA) and DRIFT Spectroscopy applied to investigate the evolution of humic acids in Forest soil at different vegetation stages. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 83 (2006) 2, 393-399.

MORAES, L.M. Avaliação da Biodegradabilidade Anaeróbia de Lodos de Esgoto Provenientes de Reatores Anaeróbios Sequênciais. 2005. 164p. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola. UNICAMP. Campinas, 2005.

MOTA, S. Introdução à engenharia ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

NUVOLARI, A., TELLES, D.D'A., RIBEIRO, J.T., MIYASHITA, N.J., RODRIGUES, R.B., ARAÚJO, R. Esgoto Sanitário – Coleta, Transporte, Tratamento e Reuso Agrícola. Editora Edgard Blücher Ltda. 1ª edição. SP-2003.

OLIVEIRA, S.V.W.B., SANTOS, A.F.S. Estudo de Viabilidade de Aplicação do Biogás no Ambiente Urbano. MBA – ADMINISTRAÇÃO. Ribeirão Preto, 2009.

PARAWIRA, W. Anaerobic Treatment of Agricultural Residues and Wastewater. Application of High-Rate Reactors. 2004. 53p. Doctoral Dissertation. Lund University. Lund: Sweden, 2004.

PECORA, V. Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso. 2006. 152p. Dissertação de Mestrado em Energia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G.E.G.; SOUSA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M.; MILHOMEN, C.C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. Revista

Liberato, Novo Hamburgo, v.11, n. 16, p. 89-188, jul./dez. 2010.

PINHEIRO, C.H.R.. Zn, Ni, Cr, Cu, Fe e S em lodo de esgoto: comportamento químico, adsorção e proposta de tratamento. 2007. 150p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PRADO, A.G.S., FARIA, E.A., PADILHA, P.M. Aplicação e Modificação Química da Sílica Gel Obtida de Areia. Química Nova, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 544 – 547, 2005.

REAMI, L. Notas de Aula Curso: Tratamento de Esgotos Domésticos – Aspectos Operacionais. ABES – Franca, 2009.

REGUEIRA, L.N., CASTIÑEIRAS, J.P., AÑÓN, J.A. Design of an experimental procedure for energy evaluation from biomass. Thermochimica Acta 420 (2004) 29–31.

RIBEIRO, A.P.R.A. Influência da qualidade do carvão e das condições operacionais no processo de combustão de uma usina termelétrica. 2002. 81p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSC. Florianópolis, 2002.

ROCHA, J. C., ROSA, A. H., CARDOSO, A. A. Introdução à Química Ambiental, 2ª ed., Bookman, 2009.

ROMDHANA, M. H., HAMASAIID, A., LAFEVIE, B., LECOMTE, D., 2009. Energy valorization of industrial biomass: Using a batch frying process for sewage sludge. Bioresour. Technol. 100, 3740 - 3744.

ROMEIRO, J.C.T. Parâmetros Químicos da solução de um solo fertilizado com lodo de esgoto em bananeiras irrigadas. 2007. 69p. Dissertação de Mestrado. UNESP. Botucatu, 2007.

SAITO, M.L. O Uso do Lodo de Esgoto na Agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos. Embrapa Meio Ambiente. 1ª edição eletrônica. Jaguariúna, 2007. Disponível em:
http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_64.pdf. Acesso em: 22 set. 2010.

SALOMON, K.R., LORA, K.R. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para diferentes Fontes de Biogás no Brasil. Biomassa e Energia, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SANT'ANNA, M.P.; CARVALHO, E.H. Otimização de Leitos de Secagem para Lodo gerado em Lagoas de Estabilização. 28º Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 2002.

SANTOS, A.D. Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo. 2003. 265p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANTOS, H.R., CAMPOS, J.R. Toxicidade do Cloreto Férrico à Biomassa de Reator Anaeróbio de Leito Expandido. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, 2003.

SHINYA, Y., YUKIHIKO, M. The Asian Biomass Handbook – A Guide for Biomass Production and Utilization. The Japan Institute of Energy. 2008, 338p.

SHIZAS, I., BAGLEY, D.M. Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. Journal of Energy Engineering, Vol. 130, N°. 2, August 1, 2004.

SILVA, D.P., RUDOLPH, V., TARANTO, O.P., 2005. The Drying of Sewage Sludge by Immersion Frying. Braz. J. Chem. Eng. 22, 271 – 276.

SILVA, K.K.B. Avaliação do desempenho de sistemas de tratamento aeróbio e anaeróbio e das características do lodo de esgoto doméstico. 2004. 132p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

SKODRAS, G., GRAMMELIS, P., BASINAS, P., KAKARAS, E., SAKELLAROPOULOS, G. Pyrolysis and Combustion Characteristics of Biomass and Waste-Derived Feedstock. American Chemical Society Ind. Eng. Chem. Res. 2006, 45, 3791-3799.

SNF. Sludge Dewatering, 2003. Disponível em: <http://www.snf.fr/>. Acesso em: 30 maio 2010.

SPAVIER, L.C., VACCARI, K.P., CASSINI, S.T.A., GONÇALVES, R.F. Estudo da Distribuição da Água Livre em Lodo de Esgoto através da Técnica Termogravimétrica. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, 2003.

SPELLMAN, F.R. Dewatering biosolids, Technomic Publishing Company, Inc., 1997.

SPERLING, M. V. Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3.ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, v. 1, p.252. 2005.

SPLIETHOFF, H. Solid Fues. In: SPLIETHOFF, H. Power Generation from Solid Fuels. Berlin: Springer, 2010. p. 15 – 54.

TARDELLI, E.R. Desenvolvimento de Pré-Formulação de Mucoadesivo Bucal como Carreador de Fármaco. 2010. 102p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Sorocaba. Sorocaba, 2010.

TAVARES, W.M. Caracterização, Tratamento e Disposição Final do Lodo de Esgoto no Brasil. 2010. 58p. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil-UFS. São Cristóvão: Sergipe, 2010.

TCHOBANOGLOUS, G., LEVERENZ, H. Impacts of New Concepts and Technology on

the Energy Sustainability of Wastewater Management. Conference Climate Change, Sustainable Development, and Renewable Energy Sources. Thessaloniki, 2009.

VIEIRA, G.E.G., PEDROZA, M.M., SOUSA, J.F., PEDROZA, C.M. O Processo de Pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

YOSHIMA, S., SILVA, C.R.A., GARRAFA, M.T.F., NAVARENHO, P.L., GADO, R. A Biomassa como Alternativa Energética para o Brasil. Revista Brasileira de Ciências Ambientais. n.2, p. 25 – 36, 2005.