UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JUANNA LAZZARI

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE LODOS OBTIDOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO

VITÓRIA/ES

2018

JUANNA LAZZARI

ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE LODOS OBTIDOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção de título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves

Co-Orientador: Msc. Renan Barroso Soares

VITÓRIA/ES

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus, por me dar forças e saúde durante todo o período para a realização dessa etapa;

A minha mãe Celina, pelo carinho, motivação e incentivo durante o período despendido para a realização desse projeto;

A minha irmã Luanna, que por mais difícil que fossem as circunstâncias, sempre teve paciência e contribuiu para a revisão desse trabalho;

Ao professor orientador, Ricardo Franci, pela orientação, confiança e por todos os ensinamentos;

Ao co-orientador Renan Barroso Soares, pelo apoio e colaboração durante o trabalho;

Ao professor Oswaldo Almeida Filho, pela ajuda, durante a realização da etapa experimental do projeto;

Ao João Pedro, pelo companheirismo, dignidade, carinho, autenticidade e amizade, que sempre esteve ao meu lado me apoiando e incentivando durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas, professores e funcionários da Universidade, pela orientação e apoio durante toda a minha graduação;

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com a minha formação e a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos é uma biomassa residual abundante em todo mundo, que pode ser usada para produzir energia. Em um cenário de intensa geração desse resíduo sólido, principalmente nos grandes centros urbanos, os problemas relacionados ao seu descarte têm aumentado, pois existem limitações quanto a sua destinação, devido a ser composto por uma grande variedade de componentes orgânicos e inorgânicos, tornando complexo o seu tratamento. Dessa forma, visando a redução destes resíduos e a busca por alternativas na geração de energia, este trabalho propõe caracterizar amostras de lodos obtidos do tratamento de efluentes por reatores anaeróbios de fluxo ascendente, como também, por lagoas de alta taxa (lodo algáceo) e lodo misto (alga digerida no reator UASB), a fim de analisar o seu potencial energético como biomassa combustível. Para isso, foram determinados, em base seca das amostras, os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, por meio da análise imediata; os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, através da análise elementar e o poder calorífico superior das amostras estudadas, por meio de uma bomba calorimétrica, como também, por correlações com a análise imediata e elementar. Os resultados mostraram que as biomassas analisadas, em base seca, apresentam teor de material volátil em torno de 60% de sua massa, exceto o lodo proveniente da manta do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães, com 44%. Entretanto, os teores de carbono fixo das amostras são bastante diversificados, variando de 8% a 26%. Quanto o teor de cinzas, percebe-se que o lodo obtido da manta do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães tem alto teor de cinzas (48% de sua massa) e o lodo algáceo o menor teor de cinzas, cerca de 11%. As amostras de lodo algáceo e lodo misto do UASB da ETE Piloto Araçás apresentaram semelhanças nos teores de C, H, O e N. Entretanto, divergiram quanto a composição elementar das biomassas coletadas do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães. O lodo algáceo apresentou o maior poder calorífico, de 18,61 MJ/kg, seguido pelo lodo misto do reator UASB da ETE Piloto Araçás 17,06 MJ/kg (manta). Contudo, o poder calorífico do lodo proveniente do tratamento anaeróbio da ETE Ulisses Guimarães apresentou os menores valores 9,75 MJ/kg (leito) e 8,88 MJ/kg (manta). Dessa forma, verifica-se que as biomassas provenientes

do tratamento de esgoto apresentam propriedades favoráveis para o processo de geração de energia, que devem ser estudadas com mais detalhamento.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Biomassa. Caracterização. Potencial energético.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al – Alumínio

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

C – Carbono

Ca – Cálcio

Cl – Cloro

CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento

CO_2 – Dióxido de Carbono

Cu – Cobre

CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DBO_5 – Demanda Bioquímica de Oxigênio após período de incubação de 5 dias

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ECA – *Elemental Composition Analyzer*

ETE – Estações de Tratamento de Esgoto

Fe – Ferro

H – Hidrogênio

H_2 – Hidrogênio gasoso

K – Potássio

LAT – Lagoas de Alta Taxa

Mg – Magnésio

N – Nitrogênio

N_2 – Nitrogênio gasoso

Na – Sódio

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

O – Oxigênio

O_2 – Oxigênio gasoso

P – Fósforo

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

RAFA – Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente

S – Enxofre

SO_2 – Dióxido de Enxofre

Si – Sílicio

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TGA – Analisador Termogravimétrico

Ti – Titânio

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

Zn – Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente.....19
Figura 2: Produtos obtidos através de processos termoquímicos de conversão da biomassa e possíveis aplicações 29
Figura 3: Localização da ETE Araçás 35
Figura 4: Foto aérea da Estação de Tratamento de Esgoto de Araçás – ETE Araçás 36
Figura 5: ETE Araçás 36
Figura 6: Planta Piloto na ETE Araçás 37
Figura 7: Localização da ETE Ulisses Guimarães 38
Figura 8: ETE Ulisses Guimarães 38
Figura 9: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães.....38
Figura 10: Esquema do sistema de tratamento de esgoto da Planta Piloto 40
Figura 11: Esquema do sistema de tratamento de esgoto da ETE Ulisses Guimarães 41
Figura 12: Fluxograma das etapas empregadas para a caracterização dos lodos obtidos no tratamento de esgoto 42
Figura 13: Reator UASB da Estação Piloto de Araçás – Ponto de Amostragem (Manta) 43
Figura 14: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães – Ponto de Amostragem (Manta) 44
Figura 15: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães – Ponto de Amostragem (Leito) 44
Figura 16: Amostra de Lodo proveniente do reator UASB da ETE Piloto de Araçás 44
Figura 17: Estufa de pré-secagem 45
Figura 18: Vista Interna da estufa de pré-secagem.....45
Figura 19: Amostra de lodo do reator UASB da ETE Piloto de Araçás 46
Figura 20: Amostra de lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães 46
Figura 21: Moinho de Argola 46
Figura 22: Amostra de lodo antes da moagem.....47
Figura 23: Amostra de lodo após a moagem.....47
Figura 24: Estufa de secagem.....47

Figura 25: Dessecador 48
Figura 26: Dessecador – Vista Interna 48
Figura 27: Lagoas de Alta Taxa da ETE Piloto de Araçás 49
Figura 28: Lagoa de Alta Taxa – Amostragem 49
Figura 29: Lagoa de Alta Taxa – Amostragem (Zoom) 49
Figura 30: Lodo algáceo após etapa de pré-secagem 50
Figura 31: Lodo algáceo após etapa de moagem e secagem.....50
Figura 32: Analisador Termogravimétrico, modelo TGA 701 (LECO). 50
Figura 33: Elemental Composition Analyzer (ECA), modelo 2400, série II (PerkinElmer) 51
Figura 34: Calorímetro modelo GCA Unicamp 53
Figura 35: Balança Analítica Quimis 53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Composição, em base seca, do lodo algáceo obtido da lagoa de alta taxa da ETE Piloto de Araçás 57
Gráfico 2: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Piloto de Araçás – Manta 57
Gráfico 3: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Ulisses Guimarães – Leito 57
Gráfico 4: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Ulisses Guimarães – Manta 57
Gráfico 5: Composição química elementar das amostras de lodo analisadas 63
Gráfico 6: Comparação dos resultados do PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise imediata 65
Gráfico 7: Comparação dos resultados do PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre lodo bruto e lodo digerido 24
Tabela 2: Teor médio de materiais voláteis de lodos obtidos no tratamento de esgoto 30
Tabela 3: Teor médio de cinzas de lodos obtidos no tratamento de esgoto 31
Tabela 4: Teor médio de carbono fixo de lodos obtidos no tratamento de esgoto 32
Tabela 5: Valores médios para a composição química elementar de lodos obtidos no tratamento de esgoto 33
Tabela 6: Valores médios para o PCS de lodos obtidos no tratamento de esgoto....34
Tabela 7: Resultados da análise imediata das amostras de lodo analisadas 56
Tabela 8: Teor de materiais voláteis das amostras de lodo analisadas 58
Tabela 9: Teor de cinzas das amostras de lodo analisadas.....59
Tabela 10: Teor de carbono fixo das amostras de lodo analisadas 60
Tabela 11: Composição química elementar média das amostras de lodo analisadas 61
Tabela 12: Estatística descritiva dos resultados da análise elementar para as amostras de lodo analisadas 62
Tabela 13: Resultados PCS obtidos experimentalmente e a partir da análise imediata 65
Tabela 14: Resultados do PCS médio obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar.....67
Tabela 15: Estatística descritiva dos resultados de PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar.....68
Tabela 16: Estatística descritiva dos resultados de PCS experimental para as amostras de lodo analisadas.....70
Tabela 17: Poder calorífico superior médio de biomassas encontradas na literatura70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

2 OBJETIVOS 16

2.1 Objetivo Geral 16

2.2 Objetivos Específicos 16

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO 17

3.1.1 Tratamento de Esgoto por Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente 18

3.1.2 Pós Tratamento de Esgoto por Lagoa de Alta Taxa 20

3.2 LODO DE ESGOTO 21

3.2.1 Definição 21

3.2.2 Composição do Lodo de Esgoto 22

3.3 TRATAMENTO PARA O LODO DE ESGOTO 23

3.3.1 Adensamento 23

3.3.2 Estabilização 23

3.3.3 Condicionamento 24

3.3.4 Desidratação 24

3.3.5 Higienização 25

3.3.6 Disposição Final 25

3.4 ALTERNATIVAS PARA A DISPOSIÇÃO DO LODO DE ESGOTO 26

3.5 LODO COMO FONTE DE ENERGIA 27

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO 29

3.6.1 Análise da Composição Química Imediata 29

3.6.2 Análise da Composição Química Elementar 32

3.6.3 Poder Calorífico 33

4 ÁREA DE ESTUDO 35

4.1 LOCALIZAÇÃO 35

4.1.1 Estação de Tratamento de Esgoto de Araçás – ETE Araçás 35

4.1.2 Planta Piloto 36

4.1.3 Estação de Tratamento de Esgoto de Ulisses Guimarães – ETE Ulisses Guimarães 37

4.2 CARACTERIZAÇÃO 38
4.2.1 Planta Piloto 38
4.2.2 Estação de Tratamento de Esgoto de Ulisses Guimarães – ETE Ulisses Guimarães 40
5 MATERIAIS E MÉTODOS 42
5.1 LODO DE ESGOTO DOS REATORES UASB 43
5.1.1 Coleta e Amostragem 43
5.1.2 Preparação das Amostras 45
5.2 LODO ALGÁCEO PROVENIENTE DA LAGOA DE ALTA TAXA 48
5.2.1 Coleta, Amostragem e Separação 48
5.2.2 Preparação das Amostras 49
5.3 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO IMEDIATA 50
5.4 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR 51
5.5 PODER CALORÍFICO SUPERIOR 52
5.5.1 Determinação do Poder Calorífico Experimental 52
5.5.2 Determinação do Poder Calorífico Superior a partir da Análise Imediata 54
5.5.3 Determinação do Poder Calorífico Superior a partir da Análise Elementar 55
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 56
6.1 ANÁLISE IMEDIATA 56
6.1.1 Teor de Materiais Voláteis 58
6.1.2 Teor de Cinzas 59
6.1.3 Teor de Carbono Fixo 60
6.2 ANÁLISE ELEMENTAR 61
6.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR 64
6.3.1 Poder Calorífico Superior a partir da Análise Imediata 64
6.3.2 Poder Calorífico Superior a partir da Análise Elementar 67
6.3.3 Comparação dos Resultados 69
7 CONCLUSÃO 73
7.1 TRABALHOS FUTUROS 75
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e o consumo excessivo de água pela sociedade, formas cada vez mais eficientes de tratamento de efluentes são requisitadas para reduzir, ao máximo, o impacto causado pelo esgoto. Hoje, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) trabalham para adequar as águas residuárias aos padrões ambientais de lançamento em corpos hídricos, sendo o lodo de esgoto o resíduo sólido proveniente desses processos.

O gerenciamento do lodo é um problema contemporâneo de preocupação mundial, devido às grandes quantidades geradas de matéria por dia, assim como, pela necessidade de destinação final adequada. O correto gerenciamento e a administração dos resíduos de saneamento apresentam grande importância ambiental, econômica e social, e estão contidos na Agenda 21 dos países. Essa agenda foi estabelecida após a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) em 1992 no Rio de Janeiro (ECO-92), a qual sugere a implantação de medidas efetivas de redução da produção, seguida de alternativas de reuso e reciclagem, e ainda a adoção de critérios para a disposição adequada desses materiais, respeitando as limitações ambientais (LEE; SANTOS, 2011; FONTES, 2003).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2016 apenas 51,9% do esgoto gerado foi coletado no Brasil e somente 74,9% dessa porcentagem foi tratado. Segundo Iwaki (2017), em 2010, estimativas apontavam uma produção nacional de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, e considerando que o tratamento de esgoto atingia apenas 30% da população urbana, mesmo sendo um dado obtido em 2010, são valores altos de produção de lodo que atualmente devem estar em maiores proporções, já que o tratamento de esgoto também aumentou consideravelmente.

Atualmente, a destinação final para esse tipo de resíduo é o envio para aterros sanitários, incineração e a utilização na agricultura como fertilizante, por meio da disposição controlada no solo. Entretanto, por causa do grande volume de lodo produzido diariamente, aliado ao crescimento populacional, somente o uso das vias tradicionais de destinação final desse resíduo se tornará inviável, tanto ambientalmente como economicamente.

A destinação do lodo de esgoto em aterros sanitários gera um alto custo operacional para a ETE, além de aumentar a produção de gases e lixiviado nestes e, devido ao grande volume de lodo gerado diariamente, há um agravamento no problema do manejo do resíduo urbano (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O uso desse resíduo na agricultura constitui a melhor forma atual para o gerenciamento do lodo, contudo também é problemática, devido à necessidade de um tratamento extremamente rigoroso da qualidade do lodo, visto que o mesmo pode apresentar em sua composição substâncias tóxicas e agentes patogênicos, prejudiciais a biota e a saúde humana (LEE; SANTOS, 2011).

A incineração do lodo também é amplamente considerada para o gerenciamento do lodo, uma vez que não exige tratamento prévio biológico ou químico, e provoca redução drástica do volume. Entretanto, apresenta alto custo, geração de gases poluentes, além da necessidade de gerenciamento das cinzas formadas após o processo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Nesse cenário de excessiva geração de lodo de esgoto e necessidade de implantação de medidas que propiciem o reuso e a reciclagem, assim como formas de destinação que respeitem as limitações ambientais, a busca por alternativas para a destinação do lodo tem sido amplamente estudada por pesquisadores de várias universidades e instituições. Uma dessas alternativas é a utilização desse resíduo como biomassa para a geração de energia.

O panorama energético brasileiro atual mostra que pouco mais de 40% de sua energia é gerada por fontes renováveis. A geração de energia por biomassa representa apenas 8% da matriz energética brasileira (EPE, 2016). A matriz, ainda pouco diversificada, não garante segurança energética, resultando muitas vezes em problemas de abastecimento, como a crise enfrentada pelo Brasil em 2015. Dessa forma, é extremamente importante a mudança de paradigma, e substituir o uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis.

A utilização do lodo como biomassa na produção de energia apresenta inúmeras vantagens, pois é uma energia limpa e independente de combustível fóssil. O lodo é considerado um resíduo sólido, sendo, usualmente, enviado para aterros sanitários. Logo, com a utilização alternativa do mesmo para produção de energia, o volume de

resíduos cujo destino são os aterros diminuirá, e consequentemente, o problema do manejo de resíduos urbanos também.

Dessa forma, este trabalho se propõe a analisar o potencial calorífico do lodo, gerado em diferentes etapas e processos de tratamento de esgoto, identificando seu potencial energético e comparando às demais biomassas atualmente utilizadas, como bagaço de cana, eucalipto e madeira de descarte, por exemplo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial calorífico dos lodos produzidos pelo tratamento anaeróbio (reator de manta de lodo – UASB), pelo pós-tratamento do efluente de UASB (lagoa de alta taxa) e de um lodo misto (alga digerida no reator UASB), e compará-los a outras biomassas, já usadas para fins energéticos.

2.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, utilizando a análise imediata das biomassas estudadas;
- Caracterizar as biomassas estudadas quanto a sua análise elementar (teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio);
- Realizar uma investigação acerca do potencial calorífico do lodo proveniente do tratamento de águas residuárias gerado pelo reator de manta de lodo (lodo misto) e pela Lagoa de Alta de Taxa de uma ETE piloto, localizada em Araçás, como também do lodo produzido pelo sistema de tratamento anaeróbio (UASB), da Estação de Tratamento da CESAN de Ulisses Guimarães;
- Identificar entre os lodos analisados qual possui a melhor performance como biomassa, visando a produção de energia;
- Comparar o potencial energético dos diferentes tipos de lodo com os tipos de biomassa mais utilizados para essa finalidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

Desde a metade do século 20, a gestão das águas residuárias representa uma preocupação crescente, devido ao aumento exponencial da população mundial, assim como, em decorrência do desenvolvimento industrial (POSADAS *et al.*, 2015). O lançamento *in natura* de esgotos sanitários em corpos hídricos, sem um tratamento prévio, pode acarretar em sérios prejuízos para a qualidade da água, como a diminuição do nível de oxigênio dissolvido e a eutrofização do corpo d'água (NUVOLARI, 2003). Isso porque o esgoto sanitário é um tipo de água residuária constituído de gases dissolvidos, matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes (fósforo e nitrogênio) e organismos patogênicos (KHAN *et al.*, 2011). Portanto, é imprescindível o seu tratamento antes do descarte nos cursos d'água.

O tratamento do esgoto consiste na remoção de poluentes de forma a adequar o efluente a uma qualidade desejada ou aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação vigente, e a escolha pelo método de tratamento dependerá das características físicas, químicas e biológicas do mesmo.

De acordo com Von Sperling (2005), para estudos de concepção e dimensionamento de sistemas de tratamento de esgotos, devem ser considerados alguns aspectos tais como: impacto ambiental do lançamento no corpo receptor, objetivos do tratamento, nível de tratamento e eficiência de tratamento pretendida.

O sistema de tratamento de esgoto é composto por etapas e redes coletoras transportam o esgoto sanitário desde o ponto de geração até a estação de tratamento. Existem situações em que há necessidade de estações elevatórias para o transporte do esgoto, visto que o relevo da região pode não propiciar o transporte do efluente por gravidade até a ETE. Após chegar a estação de tratamento, o esgoto recebe o tratamento preliminar, para remoção dos sólidos grosseiros. Em seguida, pode haver um tratamento primário para a remoção de sólidos sedimentáveis. Posteriormente os compostos carbonáceos são transformados em compostos mais simples no tratamento secundário, por meio da atividade microbiana, visando a remoção de matéria orgânica e, eventualmente, alcançar bons níveis de remoção de nutrientes. Por fim, no tratamento terciário, ocorre a adequação do efluente para seu lançamento

no corpo receptor, com remoção de nutrientes e demais poluentes que não foram suficientemente removidos no tratamento secundário (VON SPERLING, 2005).

3.1.1 Tratamento de Esgoto por Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente

Os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA), mais conhecidos como reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) são unidades de tratamento biológico cuja finalidade é a remoção de matéria orgânica carbonácea (DQO ou DBO, isto é, carboidratos, proteínas, lipídios ou seus metabólitos) em suspensão ou dissolvido nas águas residuárias (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2005). Diferentemente dos sistemas de tratamento aeróbio, o reator UASB não remove nutrientes como nitrogênio e fósforo de forma satisfatória (VON SPERLING, 2005).

Chernicharo (2007) descreve o funcionamento do reator UASB com o esgoto fluindo de forma ascendente através de uma região de lodo com elevada atividade microbiana, na qual o perfil de sólidos varia do mais denso no fundo do reator (leito de lodo), até um lodo mais disperso no topo do reator (manta de lodo). A estabilização da matéria orgânica ocorre em toda a região de lodo e a mistura do sistema é realizada pelo fluxo ascendente do efluente e das bolhas do gás produzido na digestão anaeróbia. A existência de um separador trifásico propicia que as partículas de lodo retornem à zona de digestão. Esse processo garante um tempo de retenção de sólidos adequado e a obtenção de altas concentrações de lodo anaeróbio no reator, além de permitir que o biogás se desprenda da fase líquida, possibilitando sua captura. A Figura 1, adaptada de Chernicharo (2007), mostra o desenho esquemático do UASB.

Na maioria das vezes, o lodo produzido em reatores anaeróbios não requer tratamento para a estabilização antes do processo de secagem/desidratação. Este fato, aliado ao reduzido volume de lodo produzido, aproximadamente 1/6 da produção de lodo em sistemas aeróbios, torna o tratamento e destino final de lodo em sistemas de tratamento anaeróbio muito mais simples do que em sistemas de tratamento aeróbio.

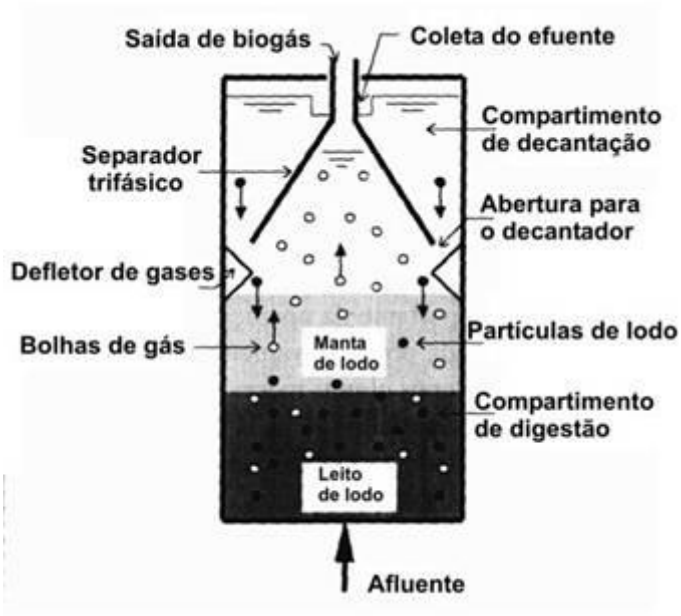

Figura 1: Esquema de um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
Fonte: Adaptada de Chernicharo, 2007.

Os reatores UASB para tratamento de efluentes, possuem vantagens e desvantagens, conforme apresenta, Von Sperling (2005). Como vantagens, pode-se retratar: eficiência satisfatória na remoção de DBO_5; baixa necessidade de grandes áreas de instalação; baixos custos de implantação e manutenção; reduzido consumo de energia; não necessita de meio suporte; construção, manutenção e operação simples; baixíssima produção de lodo; rápido reinício após períodos de paralisação; estabilização do lodo no próprio reator; necessidade apenas da secagem e disposição final do lodo. Entretanto, apresenta desvantagens, como: necessidade usual de pós-tratamento; sensibilidade relativa a variações de carga; pode vir a gerar odores desagradáveis; e a remoção de nitrogênio e fósforo é insatisfatória.

Apesar de suas inúmeras vantagens, dificilmente os reatores anaeróbios produzem um efluente que apresente qualidade a tal ponto de atender aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental. Assim sendo, a utilização de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios torna-se de grande importância, para adequar o efluente tratado aos requisitos estabelecidos pela legislação ambiental, além disso, proteger os corpos d’água dos lançamentos de esgotos. Dessa forma, a finalidade do pós-tratamento de efluentes é completar a remoção da matéria orgânica, assim como, remover constituintes que não são afetados pelo tratamento anaeróbio, por exemplo:

nutrientes como o nitrogênio e o fósforo e organismos patogênicos como vírus, bactérias, protozoários e helmintos (CHERNICHARO, 2001).

3.1.2 Pós Tratamento de Esgoto por Lagoa de Alta Taxa

Dentre as opções disponíveis para o pós-tratamento do efluente UASB, as lagoas de polimento constituem uma boa alternativa para a desinfecção dos efluentes, uma vez que mantêm a simplicidade conceitual e o baixo custo típico dos reatores anaeróbios (KHAN *et al*., 2011; VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005; SILVA, 2009).

Um exemplo que pode ser utilizado como lagoa de polimento são as Lagoas de Alta Taxa (LAT), com produção de microalgas, as quais consistem de reatores com pequena profundidade (0,1 a 0,8 m), com o objetivo de aproveitamento da incidência luminosa e consequentemente maior atividade fotossintética (CAI, PARK e LI, 2013). As Lagoas de Alta Taxa são divididas em dois ou quatro canais visando a circulação e mistura do líquido, comumente realizada por agitação mecânica, a fim de propiciar maior disponibilidade de nutrientes e CO_2, evitar a sedimentação das microalgas, promover maior eficiência de operação e, consequentemente, maior produtividade da biomassa algácea (RAZZAK *et al*., 2013; POSADAS *et al*., 2015; YAAKOB *et al*., 2011)

Esse sistema é considerado um processo de tratamento de baixo custo que, maximizando a utilização da energia solar, possibilita maior absorção de nutrientes dos esgotos, se comparado ao sistema de lagoa convencional. Contudo, as Lagoas de Alta Taxa apresentam uma elevada concentração de sólidos em suspensão, ocasionada pela expressiva presença de microalgas junto ao efluente final (TORRES, 2014).

Em estações de tratamento de esgoto, as microalgas exercem funções importantes nas lagoas de alta taxa, uma vez que fornecem oxigênio para as bactérias decompositoras e utilizam os nutrientes (fósforo e nitrogênio) das águas residuárias, constituindo-se um método alternativo para o tratamento de esgoto sanitário. Além disso, o dióxido de carbono do ambiente é fixado, contribuindo assim para a redução dos gases causadores do efeito estufa (CAI, PARK e LI, 2013). Quantidades substanciais de biomassa microalgas significam uma boa remoção de nutrientes (RAZZAK *et al.*, 2013). Além de possibilitar a remoção de nutrientes (P e N), as lagoas

de alta taxa proporcionam a incorporação de fósforo e nitrogênio na produção de algas, a fim do seu aproveitamento como biomassa para produção de energia.

3.2 LODO DE ESGOTO

3.2.1 Definição

O lodo de esgoto é o termo utilizado para se referir aos subprodutos sólidos gerados pelas estações de tratamento de esgoto e caracteriza-se por ser uma mistura de sólidos não biodegradáveis e massa bacteriana que cresce no reator. Pode-se distinguir dois tipos de lodos, o lodo primário, que é o material sedimentável do esgoto, gerado nos processos de tratamento primário, e o lodo secundário, produzido pelo tratamento biológico aeróbio ou anaeróbio do esgoto (ANDREOLLI, 2006).

De acordo com Andreolli (2006) o lodo produzido em estações de tratamento de águas residuárias pode apresentar aspectos indesejáveis, que são:

- Instabilidade biológica: nos processos de tratamento de geração de lodo primário e aeróbio existe uma grande fração de material orgânico biodegradável, o que pode ocasionar a geração de maus odores;
- Qualidade higiênica: a qualidade do lodo gerado é péssima já que o esgoto sanitário contém uma grande diversidade de vírus, bactérias e parasitas (protozoários, ovos de nematoides e helmintos), constituindo uma ameaça à saúde pública;
- Grande volume: a concentração de sólidos no lodo de esgoto é baixa, da ordem de 5 a 50 g/L, dependendo da natureza do lodo, o que ocasiona em um volume considerável.

Em virtude dessas características do lodo de esgoto, os processos de tratamento de lodo têm por objetivo reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de água, para então obter um material sólido que não constitua perigo e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a menores custos (ANDREOLLI, 2006).

3.2.2 Composição do Lodo de Esgoto

A composição básica do lodo de esgoto é água, matéria orgânica, macronutrientes, microrganismos patogênicos e compostos poluentes. Ainda que o lodo seja composto, na maioria das etapas do seu manuseio, por mais de 95% de água, é designado por convenção como fase sólida, com o intuito de distingui-lo do fluxo da fase líquida nas estações de tratamento de esgoto (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

As características do lodo de esgoto são variáveis devido ao uso indiscriminado de produtos químicos, como os utilizados na higiene humana, além do alto consumo de fármacos pela população. Assim, sua composição está relacionada diretamente ao nível sociocultural da população, como também do local de origem (residências, indústrias), época do ano e do sistema de tratamento empregado.

A fração sólida do lodo de esgoto doméstico é formada por cerca de 70% de compostos orgânicos e 30% de componentes inorgânicos (areia, sais, metais, etc.) (MELO; MARQUES, 2006), bem como microrganismos (bactérias, fungos, protozoários, vírus, helmintos, entre outros) (VON SPERLING, 2005).

A matéria orgânica do lodo de esgoto é constituída basicamente de resíduos domésticos e uma mistura complexa de gorduras, proteínas, aminoácidos, açúcares, celulose, substâncias húmicas e microrganismos, como também os bioprodutos gerados durante o processo de tratamento do esgoto (MOCELIN, 2007).

Com relação ao teor de material inorgânico, os principais elementos presentes, que são responsáveis pelo seu teor de cinzas em base seca, são Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S e Si, juntamente com menores quantidades de Cl, Cu, Ti e Zn. Estes elementos podem existir na forma de óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, cloretos e fosfatos (SHAO *et al*., 2010).

Os metais pesados presentes nesse tipo de resíduos são elementos químicos caracterizados por alta densidade e por sua natureza não degradável (BAIRD, 2002), onde determinadas concentrações e tempo de exposição oferecem risco à saúde pública e ao meio ambiente (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Tsutiya (2001) destaca que a composição do lodo de esgoto, quanto aos metais pesados, varia de acordo com o nível socioeconômico e cultural da população, o grau de industrialização da região e o percentual que os esgotos industriais representam no total de esgotos gerados e tratados.

3.3 TRATAMENTO PARA O LODO DE ESGOTO

Geralmente, o tratamento do lodo gerado em ETE envolve uma ou mais das seguintes etapas.

3.3.1 Adensamento

O processo de adensamento, também conhecido como espessamento, é um processo físico de concentração do esgoto, cuja finalidade é reduzir o seu teor de água, assim como, o seu volume, facilitando os tratamentos subsequentes do lodo (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2005). Além disso, segundo Jordão e Pessoa (2011), com a redução do volume de lodo diminui-se os custos de implantação e operação das unidades de digestão e secagem do lodo.

Entre os tipos de adensadores comumente utilizados podemos citar: o adensador por gravidade, por flotação com ar dissolvido, centrífuga, adensador de esteira e tambor rotativo (ANDREOLI, 2006).

3.3.2 Estabilização

Von Sperling e Chernicharo (2005) relatam que a estabilização do lodo de esgoto tem como objetivo atenuar os inconvenientes relacionados a geração de maus odores provenientes do processamento e disposição do lodo. Isto é realizado através da remoção da matéria orgânica biodegradável do lodo, o que também ocasiona em uma redução da massa de sólidos do lodo. Além disso, Andreoli (2006) também cita como objetivos da estabilização a redução de patógenos e a inibição, redução ou eliminação do potencial de putrefação.

Os processos de estabilização do lodo de esgoto podem ser: estabilização biológica, a qual envolve o uso de uma bactéria especifica para promover a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica; estabilização química, que envolve a adição de produtos químicos promovendo então a oxidação química da matéria orgânica e por fim, a estabilização termal, a qual ocorre pela ação do calor na fração volátil da matéria orgânica (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2005).

As tecnologias mais utilizadas para a realização da estabilização do lodo são: estabilização com cal, digestão anaeróbia, digestão aeróbia e compostagem. Sendo que no Brasil a tecnologia mais empregada para estabilização do lodo, em estações de tratamento de porte médio a grande, é a digestão anaeróbia (ANDREOLI, 2006).

A Tabela 1 apresenta uma comparação de algumas características entre o lodo bruto e o lodo digerido.

Tabela 1: Comparação entre lodo bruto e lodo digerido

Lodo bruto	**Lodo Digerido**
Matéria orgânica instável	Matéria orgânica estabilizada
Alta fração biodegradável na matéria orgânica	Baixa proporção de fração biodegradável
Alto potencial de geração de odores	Baixo potencial de geração de odores
Alta concentração de patógenos	Concentração de patógenos menor que o esgoto bruto

Fonte: Adaptado de Von Sperling; Chenicharo, 2005.

3.3.3 Condicionamento

O condicionamento é o processo de preparação dos lodos de esgoto, baseado na adição de produtos químicos como coagulantes e polieletrólitos para aumentar a sua capacidade de desidratação e melhorar a captura de sólidos nos sistemas de desidratação do lodo (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2005).

3.3.4 Desidratação

Conforme Von Sperling e Chernicharo (2005), a desidratação é um processo feito naturalmente ou por meios mecânicos, a fim de remover água e reduzir ainda mais o volume, impactando positivamente nos custos de destinação final. Assim, apresenta as seguintes finalidades:

- Redução do custo de transporte para o local de destinação final;
- Melhoria nas condições de manuseio do lodo;
- Aumento do poder calorífico do lodo através da redução do teor de umidade tendo em vista a preparação para incineração;

- Redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura;
- Redução da produção de lixiviados quando a lama é enviada para aterros sanitários.

A diversidade de processos de tratamento e disposição final de lodo sofrem mudanças frequentes em virtude dos avanços tecnológicos na área, entretanto os processos normalmente utilizados para a desidratação do lodo são: os leitos de secagem, a lagoa de lodo, o filtro prensa, filtro de esteira, centrífugas e a secagem térmica (JORDÃO; PESSOA, 2011; VON SPERLING; CHERNICHARO, 2005).

3.3.5 Higienização

De acordo com Von Sperling e Chernicharo (2005) o objetivo de incluir uma etapa de higienização do lodo é garantir um baixo nível de patogenicidade para que, dependendo da alternativa da disposição final adotada, o lodo não venha a trazer riscos à saúde da população, aos trabalhadores que irão manuseá-lo e impactos ao meio ambiente. Assim, a necessidade de adicionar esta etapa dependerá da disposição final utilizada. Os principais processos de higienização são a adição de cal ou caleagem, o tratamento térmico, a compostagem, a oxidação úmida e a radiação gama.

3.3.6 Disposição Final

Jordão e Pessoa (2011) relatam que o destino final do lodo gerado nas ETE tem se apresentado como um dos principais problemas na cadeia “coleta – tratamento – disposição final”, pois envolve estudos e decisões referentes ao condicionamento e estabilização do lodo gerado, grau de desidratação, formas de transporte, eventual reuso do lodo, eventuais impactos e riscos ambientais, além dos aspectos econômicos envolvidos. Portanto, não se trata de uma questão simples e deve ser avaliada em uma ótica abrangente.

Assim, os principais aspectos que devem ser observados para se determinar a forma e o local de destino do lodo gerado são: produção e características do lodo gerado na estação; presença de esgotos industriais no sistema de coleta, capaz de atribuir ao

lodo outras características; quantidade de lodo gerado na estação de tratamento, para a estimativa de um período de tempo no qual será realizada aquela disposição final; características especiais que possa interferir no sistema de disposição proposto, de natureza física, química e biológica (JORDÃO; PESSOA, 2011).

As principais formas para a disposição final do lodo de esgoto, segundo Von Sperling e Chernicharo (2005) são: aterro sanitário, lançamento no oceano, incineração, uso agrícola diversos e reuso industrial.

3.4 ALTERNATIVAS PARA A DISPOSIÇÃO DO LODO DE ESGOTO

A procura por alternativas viáveis para a disposição final do lodo de esgoto está em destaque como uma das preocupações mundiais previstas na Agenda 21, no que diz respeito à disposição final dos resíduos do saneamento devem ser buscadas formas de minimização da produção, maximização do reuso e da reciclagem e a promoção da disposição final e tratamento ambientalmente adequados (ANDREOLLI, 2006).

Algumas das alternativas encontradas para o aproveitamento ou disposição final do lodo de esgoto ou biossólidos são: disposição em aterro sanitário (aterro exclusivo e codisposição com resíduos sólidos urbanos); reuso industrial (produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmica e produção de cimento); incineração (incineração exclusiva e co-incineração com resíduos sólidos urbanos); disposição oceânica; recuperação de solos (recuperação de áreas degradadas e de mineração); "*landfarming*" (tratamento no solo com ou sem vegetação) e uso agrícola e florestal (aplicação direta no solo, compostagem, fertilizante e solo sintético).

Além das alternativas supracitadas, o lodo de esgoto pode ser utilizado como biomassa para a produção de energia. De acordo com Werle e Wilk (2010), existem várias tecnologias térmicas disponíveis, tanto no mercado, como em desenvolvimento, para o processamento térmico do esgoto. Tais tecnologias podem ser agrupadas em três categorias: monoincineração, co-combustão e processos alternativos como pirólise e gaseificação.

3.5 LODO COMO FONTE DE ENERGIA

De acordo com a ANEEL (2005), biomassa, do ponto de vista energético, é todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Pasquini (2014) destaca que a produção de energia elétrica e térmica, a partir da biomassa, é muito defendida como alternativa importante para países em desenvolvimento. Além de ser considerada como fonte de energia renovável mais popular, já que possui disponibilidade local de forma atrativa e abundante, como, é tecnicamente flexível na produção de energia (CAO e PAWLOWSKI, 2012).

Dentre as variadas formas de aproveitamento energético da biomassa, os processos termoquímicos possibilitam a obtenção de produtos com maior potencial e propriedades energéticas. Os processos mais utilizados são a combustão, a gaseificação e a pirólise (ADÃO, 2006).

A utilização de sistemas de cogeração permite produzir simultaneamente energia elétrica e calor útil e configuram como uma das tecnologias mais racionais para utilização de combustíveis. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, têm-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética (ANEEL, 2005).

Os processos de gaseificação, combustão e pirólise diferem-se pela quantidade de oxidante utilizado durante o processo, como também, pelos produtos gerados. A pirólise é efetuada na ausência de agente oxidante e a combustão com excesso do mesmo, enquanto que, a gaseificação utiliza de 20 a 40% do oxigênio necessário para a combustão total (VIEIRA, 2004).

Vasques (2012), define o processo da pirólise como o tratamento térmico em que a biomassa (lodo por exemplo) é volatizada sob baixa pressão na faixa de temperaturas de 350 a 500 ºC na ausência de oxigênio. Os produtos gerados durante o processo são sólidos (carvão), líquidos (óleos de pirólise) e gases (vapor d’água e gases combustíveis). Os produtos sólidos, líquidos e gasosos apresentam valores agregados que podem ser utilizados como fonte de combustíveis para o aquecimento no próprio processo ou para outros usos (VASQUES, 2012; PEDROZA, 2011). Os combustíveis líquidos resultantes do processo possuem alto rendimento e o óleo

gerado pela pirólise da biomassa, denominado bio-óleo, além de ser um combustível renovável, sendo essa a principal vantagem sobre derivados do petróleo, pode ser usado para a produção de várias substâncias químicas (GUEDES *et al*., 2010).

A combustão, geralmente é efetuada para aproveitamento de calor, gerando subprodutos gasosos, principalmente dióxido de carbono e vapor d'água (FONTS *et al.*, 2012). Para uma boa combustão, a biomassa deve possuir elevado teor de carbono fixo e material volátil, assim como alto poder calorífico superior. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a combustão, enquanto altos teores de nitrogênio e enxofre poderão resultar em altos índices de emissões de NO_x e SO_2 (DE SENA, 2005).

O processo termoquímico de conversão da biomassa em biocombustível por gaseificação transforma a biomassa em monóxido de carbono e hidrogênio através da combustão em condição de escassez de oxigênio, em relação a combustão total em altas temperaturas. A gaseificação pode ocorrer tanto em ambiente de atmosfera inerte ou reduzida de oxigênio. O gás de síntese resultante é uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio e é um biocombustível (GE *et al.*, 2016). A gaseificação tem a vantagem de produzir um gás de síntese consistente, independentemente da biomassa utilizada como matéria-prima. Isso torna a gaseificação especialmente útil para lidar com os resíduos que rotineiramente compõem uma biomassa mista (DEMIRBAS, 2006; MOHAN, PITTMAN; STEELE, 2006).

As pesquisas no âmbito das tecnologias termoquímicas de conversão de biomassa têm otimizado continuamente os sistemas, buscando ampliar as suas possibilidades efetivas de utilização (TEIXEIRA; LORA, 2004).

A Figura 2 apresenta os processos termoquímicos de conversão da biomassa, assim como seus produtos e possíveis aplicações.

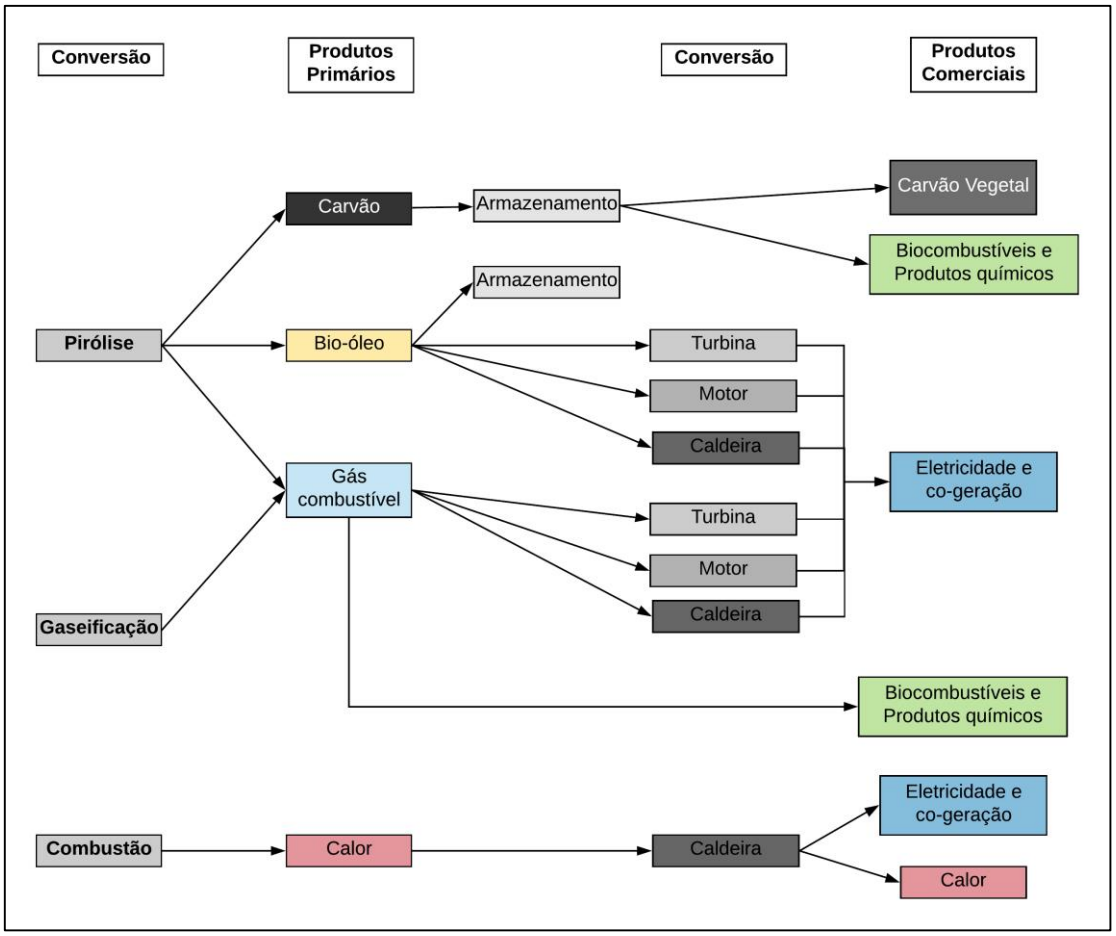

Figura 2: Produtos obtidos através de processos termoquímicos de conversão da biomassa e possíveis aplicações

Fonte: Adaptado de Bridgwater, 2012.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

A análise do potencial termoquímico para a produção de energia requer a avaliação das características térmicas e químicas das biomassas. Para a análise energética, Lora e Venturini (2012) destacam que as principais características a serem avaliadas são: a análise química elementar, a análise imediata, o poder calorífico, a composição granulométrica e a composição das cinzas.

3.6.1 Análise da Composição Química Imediata

A análise química imediata permite determinar as frações percentuais em peso das cinzas, voláteis e carbono fixo, a fim de entender o princípio da perda de massa do

material investigado e estabelecer as faixas de temperaturas a serem utilizadas nos processos de conversão térmica.

3.6.1.1 Teor de Voláteis

A quantidade de substâncias voláteis da biomassa é a fração em massa inicial de combustível que é volatizada, ou seja, convertida em gás durante o seu aquecimento, e é determinada através de medições de massa após o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850 °C e posterior resfriamento.

Segundo Lora e Venturini (2012), a quantidade de voláteis define a reatividade do combustível, assim como, parâmetros de organização do processo de combustão. Em resumo, define a facilidade com que a biomassa queima.

O material volátil existente é o resultado da combinação entre o carbono e o hidrogênio que afeta a combustão, na instabilidade da chama, formação de poluentes e eficiência global da combustão (COELHO, 2012). Quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e a interferência na ignição (KLAUTAU, 2008).

A Tabela 2 apresenta valores médios para os teores de materiais voláteis para lodos obtidos de diferentes processos de tratamento de efluentes disponíveis na literatura.

Tabela 2: Teor médio de materiais voláteis de lodos obtidos no tratamento de esgoto

Biomassa	**Teor de Materiais Voláteis (%)**	**Referência**
Lodo de Tratamento Aeróbico	48,07	Pasquini (2014)
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	42,90	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	43,30	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo de tratamento de efluentes por sistema de lodos ativados	61,20	Lee e Santos (2011)
Lodo Algáceo	65,78	Almeida Filho (2016b)

3.6.1.2 Teor de Cinzas

As cinzas constituem os resíduos após a completa queima do combustível no processo de combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos. (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008; COELHO, 2012). Dessa forma, as cinzas são o resultado da combustão da biomassa, sendo necessário o seu conhecimento para evitar operações inadequadas (VIEIRA, 2012).

A determinação do teor de cinzas é importante, visto que altos teores de cinzas contribuem para a diminuição da eficiência do processo, pois não participam do processo de combustão e são contabilizadas na massa do material submetido ao processo de queima (BRAND, 2010).

A Tabela 3 apresenta valores médios para os teores de cinzas, conforme a literatura, para lodos obtidos de diferentes processos de tratamento de efluentes.

Tabela 3: Teor médio de cinzas de lodos obtidos no tratamento de esgoto

Biomassa	**Teor de Cinzas (%)**	**Referência**
Lodo de Tratamento Aeróbico	53,47	Pasquini (2014)
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	53,30	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	47,60	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo de tratamento de efluentes por sistema de lodos ativados	35,00	Lee e Santos (2011)
Lodo Algáceo	7,84	Almeida Filho (2016b)

3.6.1.3 Teor de Carbono Fixo

Por fim, o teor de carbono fixo representa a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002). O carbono fixo é o resíduo combustível encontrado após a liberação da matéria volátil e consiste principalmente de carbono, embora contenha ainda alguns elementos voláteis não liberados (O_2; H_2; N_2, S) (COELHO; COSTA, 2012)

A Tabela 4 mostra os valores de carbono fixo para lodos obtidos de tratamento de esgoto, conforme a literatura.

Tabela 4: Teor médio de carbono fixo de lodos obtidos no tratamento de esgoto

Biomassa	**Teor de Carbono Fixo (%)**	**Referência**
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	3,80	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	9,10	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo de tratamento de efluentes por sistema de lodos ativados	3,80	Lee e Santos (2011)
Lodo Algáceo	13,09	Almeida Filho (2016b)

3.6.2 Análise da Composição Química Elementar

A composição química elementar de uma substância é o conteúdo, em porcentagem de massa ou volume, dos elementos que formam parte da sua composição química. Constitui um dos ensaios mais importantes para caracterizar quimicamente um material, pois é a base para a análise do processo de combustão, como por exemplo, os cálculos do volume de ar necessário, quantidade de gases gerados e da sua entalpia (ALMEIDA FILHO, 2016b).

Nesse ensaio são determinados os percentuais mássicos dos elementos carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre presentes na amostra da biomassa combustível. McKendry (2002) destaca que quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio, em comparação com o carbono, o valor energético de um combustível é reduzido, devido a menor energia contida em ligações carbono (C) – oxigênio (O) e carbono (C) – hidrogênio (H), que em ligações carbono (C) – carbono (C).

A Tabela 5 mostra a composição química para lodos obtidos de tratamento de esgoto, conforme a literatura.

Tabela 5: Valores médios para a composição química elementar de lodos obtidos no tratamento de esgoto

Biomassa	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Referência
Lodo de Tratamento Aeróbico	31,60	5,47	21,70	6,31	Pasquini (2014)
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	19,80	3,60	20,50	2,10	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	27,50	4,32	15,32	4,40	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo de tratamento de efluentes por sistema de lodos ativados	29,87	4,36	23,64	5,01	Lee e Santos (2011)
Lodo Algáceo	47,78	6,84	31,99	4,07	Almeida Filho (2016b)

3.6.3 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa da unidade de massa do combustível. O combustível, ao sofrer a combustão completa, libera energia térmica, e é normalmente medido em termos da energia por conteúdo por unidade de massa ou volume, por exemplo em Megajoules por quilograma (MJ/kg) no caso de combustíveis sólidos. O valor quantitativo dessa propriedade depende da composição da biomassa e do seu teor de umidade (LORA e VENTURINI, 2012).

O poder calorífico pode ser superior ou inferior. O Poder Calorífico Superior (PCS), de acordo com Lora e Venturini (2012), considera que o vapor de água presente nos gases de combustão é condensado, e o Poder Calorífico Inferior (PCI), considera que isso não acontece. A diferença entre o PCS e o PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível.

A Tabela 6 apresenta valores disponíveis na literatura para o poder calorífico superior de lodos obtidos do tratamento de esgoto.

Tabela 6: Valores médios para o PCS de lodos obtidos no tratamento de esgoto

Biomassa	**PCS (MJ/kg)**	**Referência**
Lodo de Tratamento Aeróbico	22,19 ± 0,06	Pasquini (2014)
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	8,7 ± 1,2	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	20,1 ± 0,6	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo Algáceo	21,29 ± 0,96	Almeida Filho (2016b)
Lodo Algáceo	14 a 21	Demirbas (2004)

4 ÁREA DE ESTUDO

Para o presente estudo, foi coletado o lodo produzido pelo tratamento anaeróbio por reator UASB e pós-tratamento da Estação de Tratamento de Esgoto construída em escala piloto, localizada dentro da ETE Araçás, assim como do tratamento anaeróbio por reator UASB da ETE Ulisses Guimarães. É importante ressaltar que o lodo do reator UASB da ETE piloto Araçás é um lodo misto, uma vez que, o lodo proveniente da lagoa de alta taxa (lodo algáceo) retorna ao sistema para um processo de codigestão, portanto o lodo desse reator UASB contém microalgas digeridas.

4.1 LOCALIZAÇÃO

4.1.1 Estação de Tratamento de Esgoto de Araçás – ETE Araçás

A ETE Araçás situa-se próximo a Rodovia Darly Santos, no bairro do Ibes (coordenadas geográficas 20°22'45,68"S; 40°19'36,06"O), no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo, e opera com uma capacidade nominal de 400 L/s.

A Figura 3 mostra a localização da ETE Araçás e suas adjacências. Já a Figura 4 mostra a foto aérea da estação e identificação do prédio administrativo e localização da estação piloto.

Figura 3: Localização da ETE Araçás
Fonte: Google Earth, 2017.

Figura 4: Foto aérea da Estação de Tratamento de Esgoto de Araçás – ETE Araçás
Fonte: Google Earth, 2018.

Figura 5: ETE Araçás
Fonte: CESAN, 2015.

4.1.2 Planta Piloto

A planta piloto (FIGURA 6) foi construída dentro da área da ETE Araçás, para o projeto intitulado “Soluções tecnológicas integradas para potencializar a geração de biocombustíveis em estações de tratamento de esgotos que utilizam processos a base de microalgas”, o qual é um projeto realizado em parceria da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), a empresa Fluir Engenharia Ambiental e a

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e apresenta capacidade nominal de 0,56 L/s.

Figura 6: Planta Piloto na ETE Araçás

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.1.3 Estação de Tratamento de Esgoto de Ulisses Guimarães – ETE Ulisses Guimarães

A ETE Ulisses Guimarães situa-se na Avenida Dom Pedro I (coordenadas geográficas 20°26'35,94"S; 40°20'37,85"O), no bairro de Ulisses Guimarães, no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo e opera com uma capacidade nominal de 30 L/s.

A Figura 7 mostra a localização da ETE Ulisses Guimarães e suas adjacências. Já a Figura 8 e a Figura 9 mostram a ETE Ulisses Guimarães e o sistema de tratamento do esgoto por reator UASB, respectivamente.

Figura 7: Localização da ETE Ulisses Guimarães

Fonte: Google Earth, 2017.

Figura 8: ETE Ulisses Guimarães

Fonte: Cesan, 2011.

Figura 9: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães

Fonte: Cesan, 2011.

4.2 CARACTERIZAÇÃO

4.2.1 Planta Piloto

O processo de tratamento de esgoto da planta piloto possui as etapas de tratamento preliminar, tratamento anaeróbio, e por fim, uma etapa de pós-tratamento.

Primeiramente, o esgoto bruto que chega a planta piloto passa por um sistema de gradeamento e caixa de areia, a fim de remover os sólidos grosseiros presentes no esgoto. Posteriormente, o efluente dirige-se para o reator UASB, aonde irá ocorrer a digestão anaeróbia da maior parte da matéria orgânica. Logo após, ocorre a etapa de

pós-tratamento na lagoa de alta taxa, com a finalidade de degradar a matéria orgânica remanescente, e especialmente, a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo). Nesta etapa, o efluente do UASB atua como substrato para o desenvolvimento das microalgas em conjunto com a incidência da radiação solar, assim como, o CO_2 proveniente da queima do biogás resultante da digestão anaeróbia poderá ser aplicado no sistema de microalgas para atuar como fonte de carbono.

Na sequência, ocorre o processo de separação sólido-líquido, onde objetiva-se a obtenção de uma biomassa de microalgas e um efluente final que atenda os padrões de reuso.

A biomassa algácea obtida poderá ser conduzida para a etapa de lise celular, através do processo de hidrólise, para que assim ocorra o rompimento da parede celular e, consequentemente, o aumento da biodegradabilidade anaeróbia no processo de co-digestão no reator UASB. Essa etapa final visa maximizar a produção de biogás no reator UASB aumentando assim a disponibilidade energética do sistema. Como também, o lodo obtido poderá ser utilizado em estudos de precipitação de estruvita e gaseificação do lodo algáceo e do lodo anaeróbio para produção de energia que serão estudados em pesquisas paralelas e posteriores.

Atualmente, na estação piloto de Araçás a biomassa algácea após o processo de separação sólido-líquido com o coagulante Tanfloc na concentração de 100 mg/L retorna para o reator UASB para ser digerida e elevar a produção de metano do sistema. A Figura 10 ilustra a Planta Piloto.

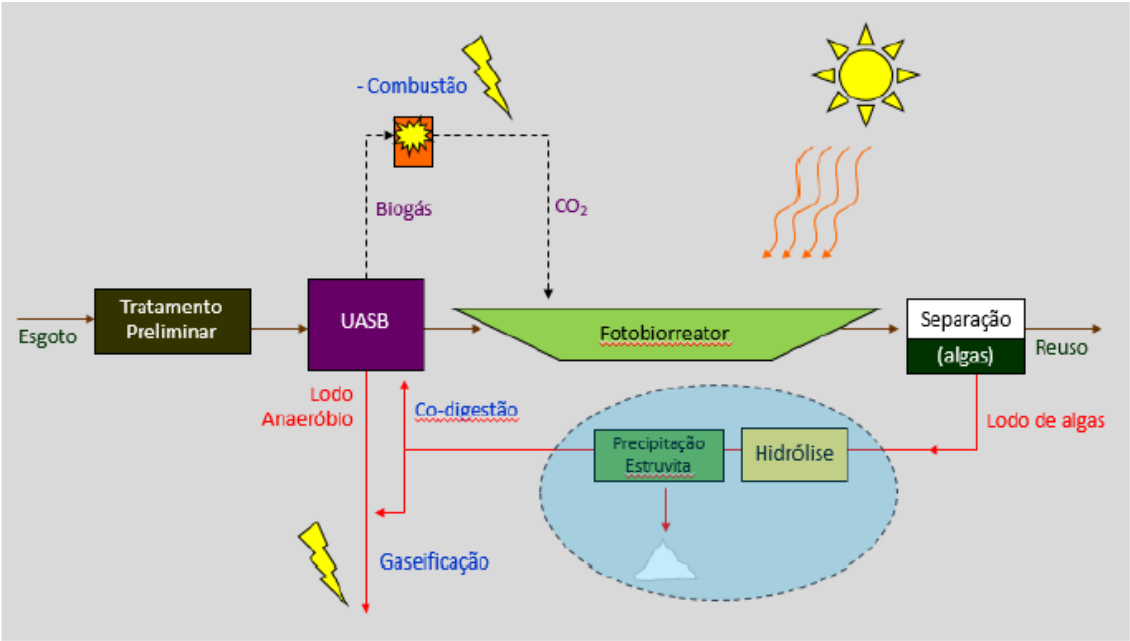

Figura 10: Esquema do sistema de tratamento de esgoto da Planta Piloto

Fonte: Azeredo, 2016.

4.2.2 Estação de Tratamento de Esgoto de Ulisses Guimarães – ETE Ulisses Guimarães

A ETE Ulisses Guimarães possui sistema de tratamento de esgoto composto por tratamento preliminar, seguido de tratamento anaeróbio com etapa de pós-tratamento. Por fim, o efluente passa por uma etapa de desinfecção.

Inicialmente, o esgoto bruto que chega a ETE passa por um sistema de gradeamento e caixa de areia, a fim de remover os sólidos grosseiros. Posteriormente, o efluente dirige-se para o reator UASB, aonde irá ocorrer a degradação anaeróbia de grande parte da matéria orgânica. Em seguida, o efluente do UASB passa por etapa de pós-tratamento no biofiltro aerado submerso, estes dispositivos tem o intuito de degradar a matéria orgânica remanescente, assim como remover os nutrientes. Após o pós-tratamento, o efluente segue para uma etapa de desinfecção por radiação ultravioleta para obtenção de um efluente final que atenda aos padrões de lançamento nos corpos hídricos.

A fase sólida, ou seja, o lodo extraído do processo de tratamento do esgoto é disposto em leitos de secagem, de onde, após o deságue, segue para a destinação final adequada em aterro sanitário. A ETE de Ulisses Guimarães também conta com

queimador de biogás, para a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa.

A Figura 11 mostra o esquema do sistema de tratamento de esgoto da ETE Ulisses Guimarães.

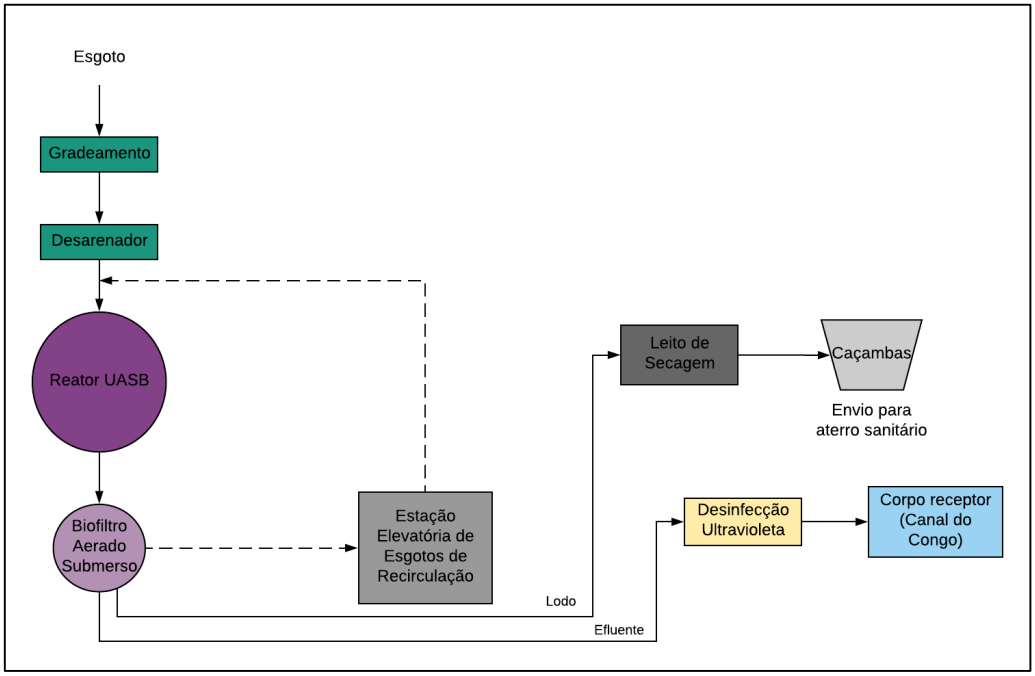

Figura 11: Esquema do sistema de tratamento de esgoto da ETE Ulisses Guimarães

Fonte: Autoria própria, 2018.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 12 apresenta o fluxograma das etapas empregadas para a caraterização do lodo proveniente do tratamento de esgoto. Cada etapa será descrita nos próximos itens.

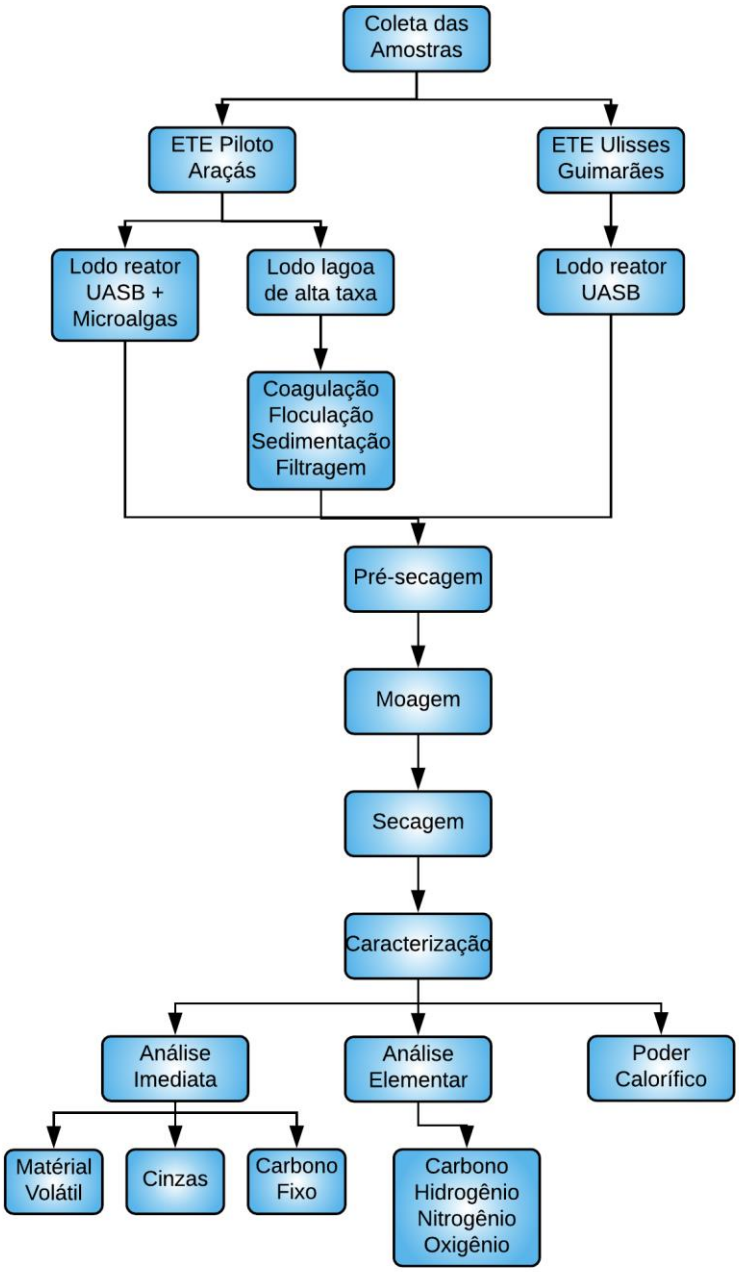

Figura 12: Fluxograma das etapas empregadas para a caracterização dos lodos obtidos no tratamento de esgoto

Fonte: Autoria própria, 2018.

5.1 LODO DE ESGOTO DOS REATORES UASB

5.1.1 Coleta e Amostragem

Foram coletadas amostras de lodo proveniente do reator UASB da Estação Piloto localizada na ETE Araçás, assim como, da ETE de Ulisses Guimarães. O ponto de amostragem, do reator UASB da Estação Piloto de Araçás foi torneira localizada a uma altura de 1,25 m correspondente a manta do reator, conforme mostrado na Figura 13. Enquanto que, na ETE Ulisses Guimarães, os pontos de amostragem foram torneiras localizadas nas alturas de 0,30 m e 1,20 m, correspondendo ao leito e a manta do reator, conforme mostrado na Figura 14 e Figura 15.

Vale ressaltar que o lodo obtido do UASB da ETE Araçás consistiu de um lodo misto, pois estava misturado com microalgas provenientes da lagoa de alta taxa. A biomassa de microalgas foi retornada ao sistema de digestão anaeróbia após o processo de separação sólido-líquido.

Figura 13: Reator UASB da Estação Piloto de Araçás – Ponto de Amostragem (Manta)

Fonte: Autoria Própria, 2017.

Figura 14: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães – Ponto de Amostragem (Manta)

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 15: Reator UASB da ETE Ulisses Guimarães – Ponto de Amostragem (Leito)

Fonte: Autoria própria, 2017.

A Figura 16 apresenta o lodo obtido do reator UASB da ETE Piloto de Araçás. Deve-se salientar que todas as amostras provenientes dos reatores UASB, tanto da ETE Piloto de Araçás, como também da ETE Ulisses Guimarães, apresentavam a característica coloração escura, a diferença visual só aparecia após a secagem das amostras.

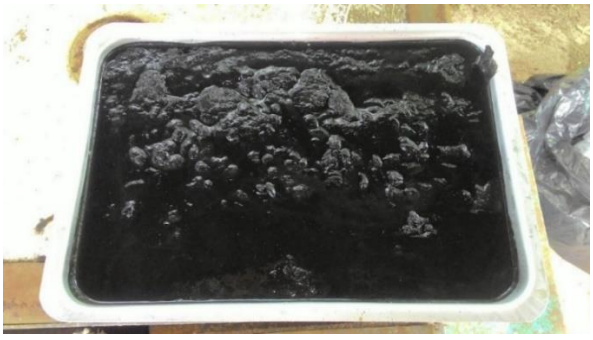

Figura 16: Amostra de Lodo proveniente do reator UASB da ETE Piloto de Araçás

Fonte: Autoria própria, 2017.

5.1.2 Preparação das Amostras

5.1.2.1 Etapa de Pré-secagem

Após a coleta e transporte, as amostras de lodos de esgoto eram transferidas de seus respectivos recipientes para bandejas de alumínios e deixadas na estufa de pré-secagem por um período de 12 a 24 horas na temperatura de 60 ºC. A estufa de pré-secagem foi disposta em ambiente aberto, para que os odores fossem dissipados. Após este processo, as amostras foram então armazenadas em potes plásticos bem vedados, para evitar a incorporação de umidade do ar.

A estufa de pré-secagem é de material em aço carbono, que apresenta em sua base uma resistência elétrica de 500 W. Para o aquecimento e carreamento da umidade da biomassa foi utilizado um ventilador centrífugo que insuflava ar sobre a resistência elétrica, no sentindo ascendente, permitindo então a secagem da biomassa.

A Figura 17 e a Figura 18 ilustram a estufa de pré-secagem e a vista interna da mesma.

Figura 17: Estufa de pré-secagem

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 18: Vista Interna da estufa de pré-secagem

Fonte: Autoria própria, 2017.

A Figura 19 e a Figura 20 apresentam as amostras dos reatores UASB após a etapa de pré-secagem.

Figura 19: Amostra de lodo do reator UASB da ETE Piloto de Araçás

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 20: Amostra de lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães

Fonte: Autoria própria, 2017.

É importante destacar o odor característico que era exalado durante a pré-secagem das amostras de lodo de esgoto doméstico e a coloração das biomassas. A amostra de lodo do reator UASB da ETE Piloto de Araçás, assim como, a do lodo coletado da ETE Ulisses Guimarães apresentaram característica coloração escura.

5.1.2.2 Etapa de Moagem

As amostras foram trituradas em moinho de argola para adequação aos ensaios de caracterização. A Figura 21, Figura 22 e Figura 23 apresentam, respectivamente, o equipamento utilizado para a moagem das amostras de lodo, a amostra de lodo antes da moagem e após a moagem.

Figura 21: Moinho de Argola

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 22: Amostra de lodo antes da moagem

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 23: Amostra de lodo após a moagem

Fonte: Autoria própria, 2017.

Após a moagem, as amostras eram armazenadas em potes plásticos, completamente fechados, até a realização dos ensaios.

5.1.2.3 Etapa de Secagem

Para garantir a total retirada de umidade da amostra para prosseguimento do ensaio de poder calorífico foi realizada secagem complementar. As amostras eram colocadas em estufa a 102 ºC até massa constante por um período de 12 a 24 horas antes das análises, para eliminar qualquer umidade reincorporado no período de armazenamento. Ressalta-se que nesta segunda etapa de secagem, não foi observado nenhum odor característico.

A estufa de secagem (Figura 24) consistiu de uma estufa de esterilização convencional, com operação na temperatura de 102 ºC, onde foi adaptada a mesma um pequeno exaustor para auxílio no carreamento da umidade.

Figura 24: Estufa de secagem

Fonte: Autoria própria, 2017.

5.1.2.4 Etapa no Dessecador

As amostras antes da realização do ensaio de determinação do poder calorífico eram colocadas em um dessecador (FIGURA 25; FIGURA 26) até atingirem a temperatura ambiente, ou por no mínimo, trinta minutos.

Figura 25: Dessecador

Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 26: Dessecador – Vista Interna

Fonte: Autoria própria, 2018.

5.2 LODO ALGÁCEO PROVENIENTE DA LAGOA DE ALTA TAXA

5.2.1 Coleta, Amostragem e Separação

A coleta foi realizada na lagoa de alta taxa da Estação Piloto localizada na ETE de Araçás (FIGURA 27; FIGURA 28; FIGURA 29).

Para a separação do lodo algáceo foi utilizado os mecanismos de coagulação e floculação. O coagulante utilizado foi o Tanfloc na concentração de 100 mg/L, o qual é um polímero orgânico-catiônico de baixo peso molecular, de origem essencialmente vegetal. Após a coagulação/floculação do lodo algáceo, esperou-se a sedimentação do mesmo, e então foi realizado um adensamento em tecido comum, exercendo pressão para remover o excesso de água livre.

Figura 27: Lagoas de Alta Taxa da ETE Piloto de Araçás

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 28: Lagoa de Alta Taxa – Amostragem

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 29: Lagoa de Alta Taxa – Amostragem (Zoom)

Fonte: Autoria própria, 2017.

5.2.2 Preparação das Amostras

Da mesma forma que realizado para o lodo obtido dos reatores UASB da ETE Piloto de Araçás e ETE Ulisses Guimarães a preparação das amostras de logo algáceo proveniente das lagoas consistiu nas etapas de pré-secagem, moagem, secagem e acondicionamento. A Figura 30 e Figura 31 mostram a amostra de lodo algáceo após as etapas citadas anteriormente.

Figura 30: Lodo algáceo após etapa de pré-secagem

Fonte: Autoria própria, 2018.

Figura 31: Lodo algáceo após etapa de moagem e secagem

Fonte: Autoria própria, 2018.

5.3 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO IMEDIATA

A análise da composição imediata permite identificar os teores de carbono fixo, sólidos voláteis e cinzas. As amostras estudadas foram enviadas após a etapa de pré-secagem e moagem para laboratório externo a universidade para a realização dos ensaios de composição imediata, os quais foram feitos utilizando um Analisador Termogravimétrico (TGA), modelo TGA 701, fabricado pela LECO (FIGURA 32).

Figura 32: Analisador Termogravimétrico, modelo TGA 701 (LECO).

Fonte: LECO, [s.d.].

A análise de sólidos voláteis foi realizada a 950 ºC, usando uma atmosfera inerte de nitrogênio, enquanto que a análise de cinzas foi realizada a 750 ºC, utilizando uma atmosfera oxidante de oxigênio, segundo recomendação da norma ASTMD5142. O teor de carbono fixo foi obtido a partir da Equação 1.

$$F = 100 - V - A \quad (1)$$

Onde:

F Teor de carbono fixo (percentual)

V Teor de material volátil (percentual)

A Teor de cinzas (percentual)

5.4 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR

A composição elementar de uma substância é o teor, em porcentagem de massa ou volume, dos elementos que formam parte da sua composição química. A análise da composição química elementar constitui um dos ensaios mais importantes para caracterizar o material quanto sua forma química (ALMEIDA FILHO, 2016b).

Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados utilizado um *Elemental Composition Analyzer* (ECA), modelo 2400, série II (FIGURA 33), fabricado pelo PerkinElmer. O teor de oxigênio das biomassas analisadas foi obtido a partir da Equação 2. Os ensaios foram realizados em triplicata.

Figura 33: Elemental Composition Analyzer (ECA), modelo 2400, série II (PerkinElmer)

Fonte: PerkinElmer, [s.d.]

$$O = 100 - C - H - N \tag{2}$$

Onde:

O Teor de oxigênio (percentual)

C Teor de carbono (percentual)

H Teor de hidrogênio (percentual)

N Teor de nitrogênio (percentual)

5.5 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

5.5.1 Determinação do Poder Calorífico Experimental

De acordo com Borges, Sellin e Medeiros (2008), a energia liberada em um processo de combustão normalmente é determinada pelo poder calorífico, definido como a quantidade de calor desprendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível.

Essa quantidade de calor desprendida não pode ser medida diretamente, contudo este calor provoca um aquecimento em um certo sistema conhecido (recipiente calorimétrico) e fornece uma diferença de temperatura na água nele contida. Dessa forma, na bomba calorimétrica uma certa massa de combustível é queimada, então obtém-se essa variação de temperatura. De posse da capacidade calorífica do calorímetro, ou seja, a quantidade de calor necessária para aquecer o aparelho de 1 ºC determina-se o poder calorífico superior do combustível através das seguintes equações.

$$Q = m \times PCS = C \times \Delta T \tag{3}$$

$$PCS = \frac{C \times \Delta T}{m} \tag{4}$$

Onde:

Q Quantidade de calor desprendida pela combustão do combustível

m Massa do combustível

C Capacidade calorífica

ΔT Variação de Temperatura

PCS Poder calorífico

Desde que o calorímetro não sofra alterações, sua capacidade calorífica permanece constante e pode ser determinada pela combustão de uma substância de poder calorífico bem conhecido, geralmente utiliza-se o ácido benzoico.

Para a determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras de lodo foi utilizado o calorímetro do modelo GCA-Unicamp (FIGURA 34) e balança analítica (FIGURA 35). Inicialmente, foi realizada calibração do calorímetro com a utilização de um combustível de poder calorífico conhecido, o ácido benzoico. Para a determinação da constante do equipamento foram realizados três ensaios.

Figura 34: Calorímetro modelo GCA Unicamp

Fonte: Autoria própria, 2017.

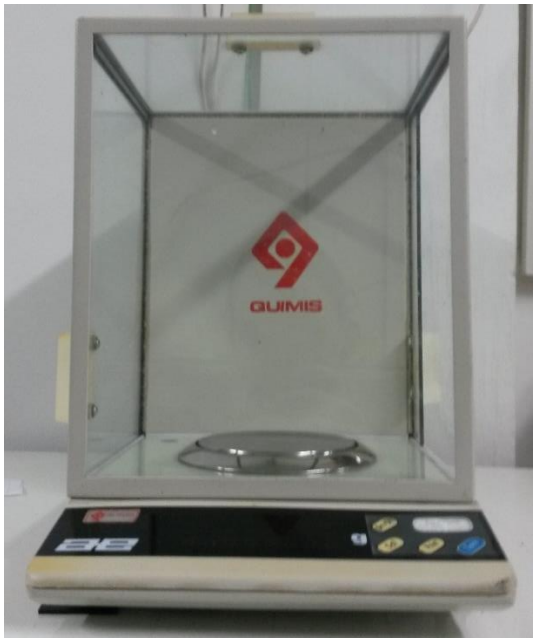

Figura 35: Balança Analítica Quimis

Fonte: Autoria própria, 2017.

O poder calorífico das biomassas foi determinado de acordo com o procedimento desenvolvido por Almeida Filho (2016a), baseado na norma ABNT NBR 11956:1990,

sendo que para cada tipo de amostra de lodo foi realizado três ensaios para determinar o poder calorífico superior médio para cada amostra. Além disso, as amostras antes de irem para o calorímetro foram secadas em estufa a 102 ºC até a massa não se alterar.

5.5.2 Determinação do Poder Calorífico Superior a partir da Análise Imediata

A determinação do poder calorífico, a partir da análise imediata, foi realizada por meio de correlações da literatura. A primeira foi a equação desenvolvida por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005), na qual foram consideradas 450 tipos de biomassas e apresentou um erro absoluto de 3,74%.

$$PCS = 0{,}3536 \times CF + 0{,}1559 \times V + 0{,}0078 \times A \quad (5)$$

O PCS também foi determinado pela correlação desenvolvida por Demirbas (1997), onde foram consideradas 16 tipos de biomassas e apresentou um erro relativo de 2,20%.

$$PCS = 0{,}196 \times CF + 14{,}119 \quad (6)$$

Além das correlações de Parikh, Channiwala e Ghosal e Demirbas foi calculado o PCS a partir da equação estabelecida por Cordero *et al.* (2001), onde foram consideradas 24 tipos de biomassas misturadas com carvão e apresentou erro relativo de -7,74 a 4,42%.

$$PCS = 354{,}3 \times CF + 178{,}8 \times V, considerando\ V + CF + A = 100\% \quad (7)$$

Onde:

V Percentual de material volátil

CF Percentual de carbono fixo

A Percentual de cinzas

5.5.3 Determinação do Poder Calorífico Superior a partir da Análise Elementar

Além das correlações com a análise imediata para a determinação do poder calorífico superior, existem disponíveis na literatura correlações com a composição elementar. Na sequência estão algumas fórmulas que permitem calcular diretamente o poder calorífico superior, a partir da composição elementar do combustível.

- Fórmula de Dulong (NZIHOU *et al.*, 2014)

$$PCS = 4{,}18 \times (78{,}4 \times C + 241{,}3 \times H + 22{,}1 \times S) \times 10^{-3} \quad (8)$$

- Fórmula de Vandralek (NZIHOU *et al.*, 2014)

$$PCS = 4{,}18 \times (85 \times C + 270 \times H + 26 \times (S - O) \times 10^{-3} \quad (9)$$

- Fórmula de Demirbas (DEMIRBAS, 1997)

$$PCS = 33{,}5 \times C + 142{,}3 \times H - 15{,}4 \times O - 14{,}4 \times N) \times 10^{-2} \quad (10)$$

Onde:

PCS – Poder Calorífico Superior (MJ/kg)

C – Teor de Carbono (%)

H – Teor de Hidrogênio (%)

O – Teor de Oxigênio (%)

N – Teor de Nitrogênio (%)

S – Teor de Enxofre (%)

A determinação do poder calorífico pelas Equações 8 e 9 levam em consideração o teor de enxofre presente no combustível, contudo para o presente trabalho este termo foi desprezado, visto que os teores de enxofre provenientes de amostras de lodo de esgoto são muito pequenos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE IMEDIATA

A composição, em base seca, do lodo misto do UASB da ETE Piloto de Araçás, do lodo do UASB da ETE Ulisses Guimarães (leito e manta) e do lodo algáceo obtidas da análise imediata são apresentadas na Tabela 7 e nos gráficos abaixo.

Tabela 7: Resultados da análise imediata das amostras de lodo analisadas

Biomassa	Teor de material volátil	Teor de cinzas	Teor de carbono fixo
Lodo Algáceo	62,69%	11,20%	26,11%
Lodo Misto do UASB ETE Piloto Araçás – Manta	60,84%	24,27%	14,89%
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Leito	60,78%	24,32%	14,90%
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta	43,97%	48,16%	7,87%

A partir da análise da Tabela 7 e do Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4, verifica-se que todas as amostras de lodo apresentaram percentual de material volátil em torno de 60%, com exceção da amostra coletada da manta do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães, com cerca de 44% de materiais voláteis. Com relação ao teor de cinzas, a amostra que apresentou maior percentual foi a do lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães da manta, com cerca de 48%, portanto, esse tipo de lodo contém alto teor de substâncias inorgânicas, e apresenta o menor potencial para aproveitamento energético, visto que, possui alta geração de cinzas e também baixo percentual de carbono fixo. Com relação as outras biomassas analisadas, verifica-se que quanto ao teor de carbono fixo apresentam valores em torno de 15%, com exceção do lodo algáceo com cerca de 26% de carbono fixo em sua composição e do lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães com cerca de 8%. A geração de cinzas da biomassa proveniente do lodo algáceo é baixa, cerca de 11% da sua massa, enquanto que as biomassas provenientes do reator UASB da ETE Piloto de Araçás produz cerca de 25% da sua massa de cinzas, assim como, o lodo obtido do leito do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães.

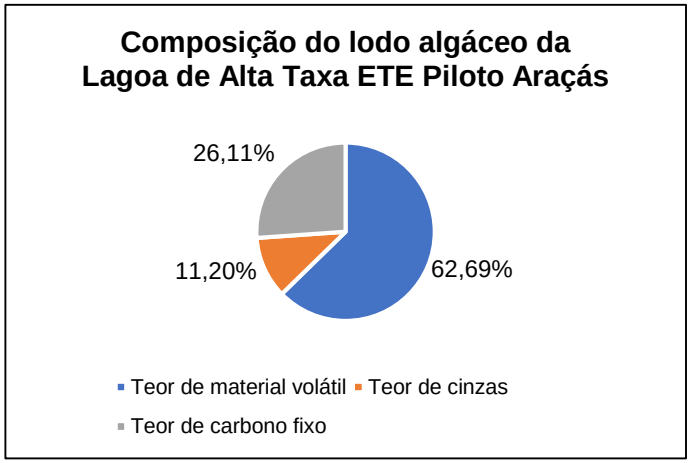

Gráfico 1: Composição, em base seca, do lodo algáceo obtido da lagoa de alta taxa da ETE Piloto de Araçás

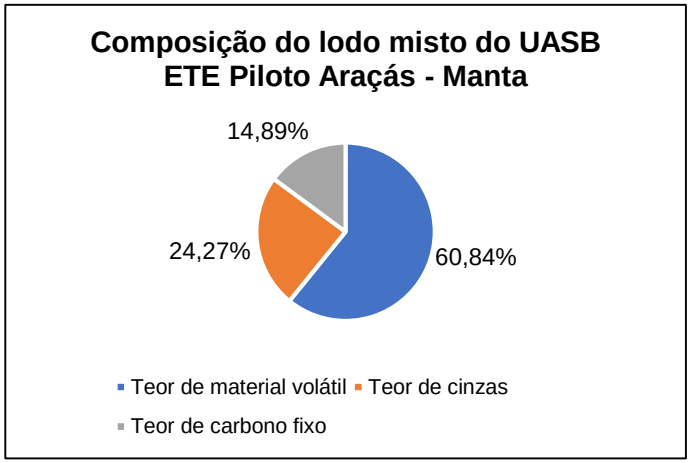

Gráfico 2: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Piloto de Araçás – Manta

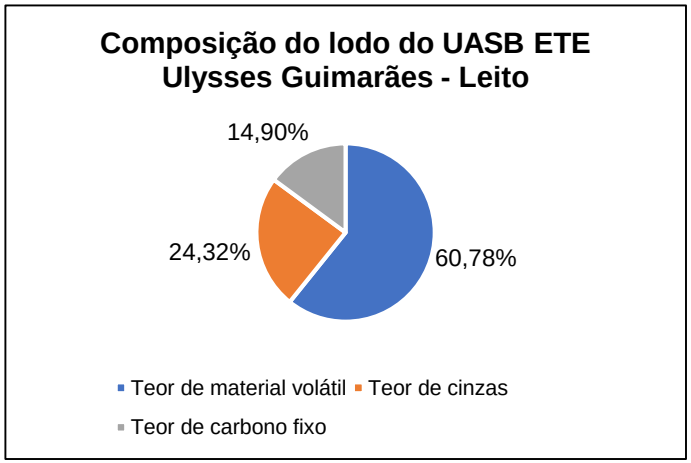

Gráfico 3: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Ulisses Guimarães – Leito

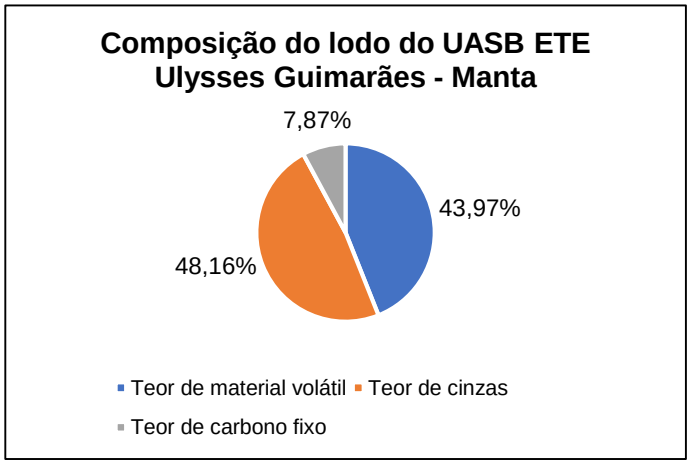

Gráfico 4: Composição, em base seca, do lodo obtido do UASB da ETE Ulisses Guimarães – Manta

Com relação a diferença entre os teores de cinza do lodo do UASB da ETE Ulisses Guimarães leito e manta, verifica-se que a manta do UASB apresentou maior teor de cinzas quando comparado ao leito do UASB, pois o lodo da manta do UASB é um lodo com um tempo de residência maior no reator e trata-se de uma matéria mais digerida que o lodo proveniente do leito do reator.

6.1.1 Teor de Materiais Voláteis

A análise do teor de materiais voláteis é interessante no quesito de verificação do potencial energético de biomassas, visto que desenvolve um papel importante na ignição do combustível e nas primeiras etapas da combustão, onde após a volatização dos elementos químicos, estes se misturam com o oxigênio do ar promovendo as reações de combustão (BRAND, 2010; CORTEZ; LORA; OLIVARES GÓMEZ, 2008)

A Tabela 8, apresenta os resultados do teor de materiais voláteis das amostras de biomassa analisadas.

Tabela 8: Teor de materiais voláteis das amostras de lodo analisadas

Biomassa	Teor de material volátil (%)
Lodo Algáceo	62,69
Lodo misto do UASB ETE Piloto Aracás – Manta	60,84
Lodo UASB Ulisses Guimarães – Leito	60,78
Lodo UASB Ulisses Guimarães – Manta	43,97

A partir da Tabela 8, observa-se que a biomassa que apresentou o maior resultado para teor de materiais voláteis foi o lodo algáceo obtido da Lagoa de Alta Taxa da ETE Piloto de Araçás, com 62,69%, contudo as outras biomassas avaliadas (lodo misto do UASB ETE Araçás e lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Leito) apresentam valores de teor de materiais voláteis em torno de 61%, com exceção do lodo do UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta, que apresentou o valor mais baixo de 43,97%.

Dados disponíveis na literatura indicam valores de 61,2% de material volátil (LEE; SANTOS, 2011) para lodo aeróbio de esgoto doméstico, valor este muito próximo para

as amostras de lodo algáceo, lodo misto do UASB da ETE Araçás e lodo do UASB ETE Ulisses Guimarães (Leito). Outros valores para o lodo aeróbio de esgoto doméstico também encontrados são de 43,3% (BORGES; SELLIN; MEDEIROS, 2008) e 48,07% (PASQUINI, 2014), os quais são próximos dos resultados de material volátil para o lodo do UASB da ETE Ulisses Guimarães (Manta). Rosa *et al.* (2015) encontrou para o lodo desidratado do reator UASB após filtro prensa cerca de 43% de teor de voláteis, resultado próximo ao encontrado para o lodo do reator UASB da ETE Ulysses Guimarães – Manta. Almeida Filho (2016b) obteve o valor de 65,78% para o lodo algáceo, resultado maior que o do presente estudo.

6.1.2 Teor de Cinzas

Outra análise importante quanto o potencial energético da biomassa é a determinação do teor de cinzas, que são constituídas por todo o material que não queima, assim gerando resíduos do processo de combustão, portanto, teores de cinzas altos colaboram para a redução da eficiência do processo, já que não participam da combustão e são contabilizadas na massa do combustível submetido ao processo de queima.

A Tabela 9 apresenta os resultados para o teor de cinzas das amostras analisadas.

Tabela 9: Teor de cinzas das amostras de lodo analisadas

Biomassa	**Teor de cinzas (%)**
Lodo Algáceo	11,20
Lodo misto do UASB ETE Piloto Araçás – Manta	24,27
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Leito	24,32
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta	48,16

O lodo resultante do UASB ETE Ulisses Guimarães (manta) foi o que apresentou o maior teor cinzas, com 48,16%, o que significa que quase metade desse tipo de biomassa não participa do processo de combustão. Já o lodo algáceo proveniente da Lagoa de Alta Taxa da ETE Piloto de Araçás apresentou o menor resultado para o teor de cinzas, com 11,20%. O teor de cinzas encontrado na literatura para o lodo aeróbio de esgoto doméstico foi de 47,6% (BORGES; SELLIN; MEDEIROS, 2008) e

53,47% (PASQUINI, 2014), os quais são maiores do que o das amostras de biomassa do presente estudo, indicando que o lodo de esgoto doméstico analisado possui uma maior fração de massa que participa do processo de combustão liberando energia. Rosa *et al.* (2015) encontrou para o lodo desidratado do reator UASB após filtro prensa cerca de 53% de teor de cinzas, resultado próximo ao encontrado para o lodo do reator UASB da ETE Ulysses Guimarães – Manta. Almeida Filho (2016b) obteve o valor de 7,84% para o lodo algáceo, resultado menor que o do presente estudo.

6.1.3 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo, é obtido a partir dos valores de teor de cinzas e material volátil e representa a duração da queima da biomassa, quanto maior o teor de carbono fixo mais demorada é a queima resultando em um maior tempo de residência no equipamento (BRAND, 2010). Os teores de carbono fixo das amostras analisadas estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10: Teor de carbono fixo das amostras de lodo analisadas

Biomassa	**Teor de carbono fixo (%)**
Lodo Algáceo	26,11
Lodo misto do UASB ETE Piloto Araçás – Manta	14,89
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Leito	14,90
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta	7,87

A Tabela 10 mostra que o Lodo Algáceo é o que apresenta maior teor de carbono fixo, com 26,11%, seguido do lodo UASB Ulisses Guimarães (leito) e lodo misto do UASB ETE Piloto Araçás, com 14,89% e 13,32%, respectivamente, e por fim, o lodo UASB Ulisses Guimarães (manta), com 7,87%.

Os valores da literatura mostram para o lodo aeróbio de esgoto doméstico teores de carbono fixo de 9,1% (BORGES; SELLIN; MEDEIROS, 2008), e para o lodo algáceo de 13,09% (ALMEIDA FILHO, 2016b), valores bem diversificados quando comparados ao das amostras analisadas.

6.2 ANÁLISE ELEMENTAR

Na Tabela 11, Tabela 12 e no Gráfico 5 são apresentados os resultados da análise elementar dos lodos.

Tabela 11: Composição química elementar média das amostras de lodo analisadas

Biomassa	**Elementos presentes na biomassa (% da massa)**							
	C	σ_C	**H**	σ_H	**N**	σ_N	**O***	σ_O
Lodo Algáceo	47,74	0,88	5,90	0,14	6,28	0,10	28,89	1,09
Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás – Manta	42,04	2,49	5,81	0,51	4,95	0,29	22,92	3,27
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Leito	28,67	0,83	4,20	0,15	4,20	0,15	39,43	0,99
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta	27,30	2,98	4,01	0,56	3,14	0,34	17,39	3,88

(*) O percentual de oxigênio das amostras analisadas foi obtido pela diferença.

Tabela 12: Estatística descritiva dos resultados da análise elementar para as amostras de lodo analisadas

Estatística	**Lodo Algáceo**				**Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás – Manta**				**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Leito**				**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães – Manta**			
	C	H	N	O*	C	H	N	O*	C	H	N	O*	C	H	N	O*
Número de Amostras	3				3				3				3			
Média	47,74	5,90	6,28	28,89	42,04	5,81	4,95	22,92	28,67	4,20	3,38	39,43	27,30	4,01	3,14	17,39
Mediana	47,49	5,97	6,25	29,09	43,21	6,00	5,11	21,21	28,86	4,14	3,39	39,06	25,88	3,77	2,96	19,23
Máximo	48,71	5,99	6,39	29,86	43,74	6,20	5,12	26,69	29,39	4,37	3,48	40,55	30,72	4,65	3,53	20,01
Mínimo	47,01	5,74	6,19	27,71	39,18	5,24	4,62	20,87	27,77	4,10	3,26	38,67	25,30	3,60	2,93	12,94
Desvio Padrão	0,88	0,14	0,10	1,09	2,49	0,51	0,29	3,27	0,83	0,15	0,11	0,99	2,98	0,56	0,34	3,88
Coeficiente de variação	1,85	2,35	1,60	3,75	5,76	8,50	5,68	15,42	2,88	3,62	3,24	2,53	11,51	14,85	11,49	20,18

(*) O percentual de oxigênio das amostras analisadas foi obtido pela diferença.

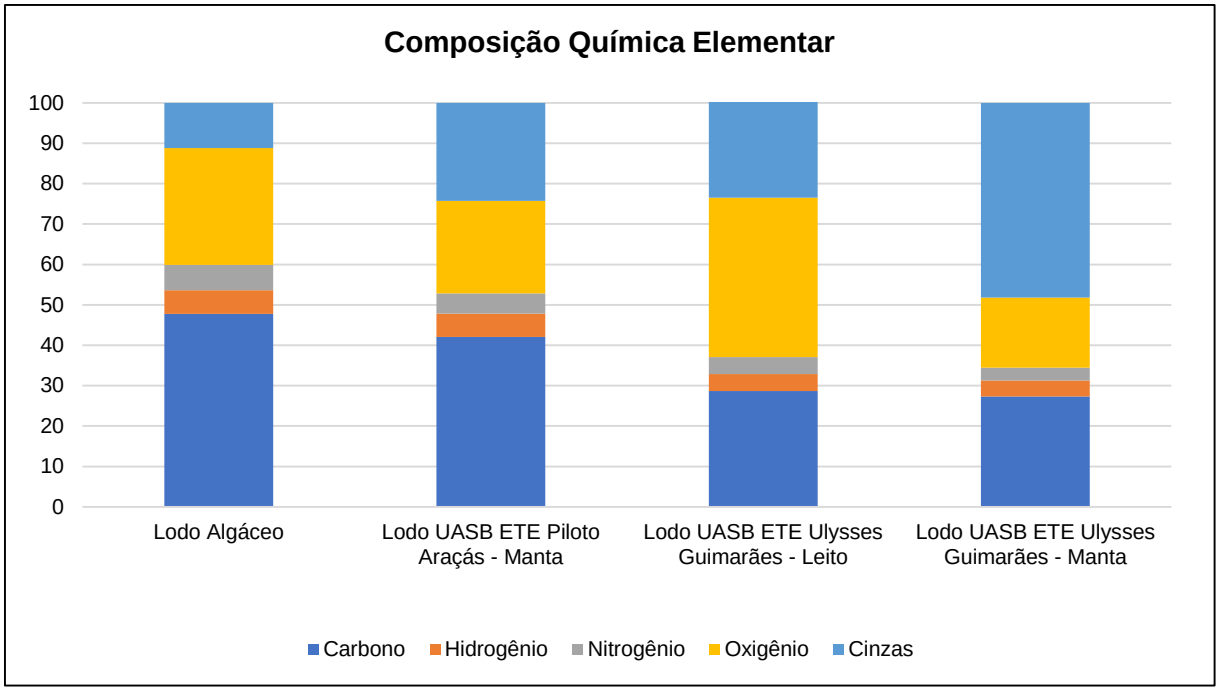

Gráfico 5: Composição química elementar das amostras de lodo analisadas

A partir da análise da Tabela 11, Tabela 12 e do Gráfico 5 verifica-se que o lodo obtido do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães apresenta a menor porcentagem de carbono (27,30% Manta e 28,67% Leito) seguido pelo lodo misto obtido do reator UASB da ETE Piloto de Araçás (Manta 42,04%) e lodo algáceo (47,74%). Quanto ao conteúdo de hidrogênio das amostras verifica-se que para todas as biomassas analisadas os valores encontram-se na faixa de 4% a 6%.

Com relação ao teor de nitrogênio, os valores encontrados em ordem crescente foram: 3,14% e 4,20% para o lodo obtido do UASB da ETE Ulisses Guimarães – Manta e Leito, respectivamente, 4,95% para o UASB da ETE piloto de Araçás e 6,28% para o lodo algáceo proveniente da Lagoa de Alta Taxa da ETE Piloto de Araçás. Todos os resultados obtidos encontram-se na mesma ordem de grandeza dos valores encontrados por Büttelbrun (2004), que foi de 4,57%. Apesar de os teores de nitrogênio obtidos serem abaixo de 7%, esse parâmetro merece atenção uma vez que pode interferir competindo com o carbono durante a queima do combustível e formar compostos nitrogenados oxidados.

Os elementos Carbono e Hidrogênio contribuem positivamente para o Poder Calorífico Superior e o conteúdo de Oxigênio negativamente. Além de o hidrogênio influenciar no Poder Calorífico Inferior, devido a formação de água (POKORNA *et. al*, 2009). A porcentagem de carbono encontrado para todas as amostras de lodo analisadas está

de acordo com Correia (2009), onde mostra que o carbono orgânico está presente na massa seca de lodo em concentrações que variam entre 18% e 50%, e é derivado naturalmente da decomposição de plantas e animais.

6.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O poder calorífico de uma biomassa é uma das principais propriedades a serem analisados ao avaliar o seu potencial para a geração térmica a partir da combustão. Brand (2010) define o poder calorífico como a quantidade de energia liberada pelo combustível (biomassa) na forma de calor durante a combustão completa. Assim, quanto maior o seu valor mais qualificado é o combustível para o uso na geração de energia térmica. O poder calorífico foi determinado tanto experimentalmente por meio da bomba calorimétrica, tanto pelo uso de correlações com a análise imediata e elementar das biomassas estudadas.

Os tópicos seguintes apresentam os resultados obtidos para o poder calorífico das biomassas estudadas obtido experimentalmente e determinado pelas correlações com a análise imediata e elementar.

6.3.1 Poder Calorífico Superior a partir da Análise Imediata

A Tabela 13 e o Gráfico 6 apresentam os resultados para o PCS obtidos pelas Equações de Parikh, Channiwala e Ghosal, Demirbas e Cordero *et al.*, as quais utilizam os teores de carbono fixo, sólidos voláteis e cinzas para determinação do poder calorífico.

.

Tabela 13: Resultados PCS obtidos experimentalmente e a partir da análise imediata

Biomassa	Experimental		Parikh, Channiwala e Ghosal		Demirbas		Cordero *et al.*	
	PCS (MJ/kg)	σ_{PCS}	PCS (MJ/kg)	E_r (%)	PCS (MJ/kg)	E_r (%)	PCS (MJ/kg)	E_r (%)
Lodo Algáceo	18,61	0,68	20,50	10,13	20,48	10,04	21,36	14,79
Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás - Manta	17,06	1,20	15,58	8,68	19,01	11,41	16,31	4,41
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Leito	9,75	0,84	15,54	59,28	10,65	9,16	16,26	66,74
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Manta	8,88	0,82	10,70	20,39	12,33	38,80	10,98	23,61

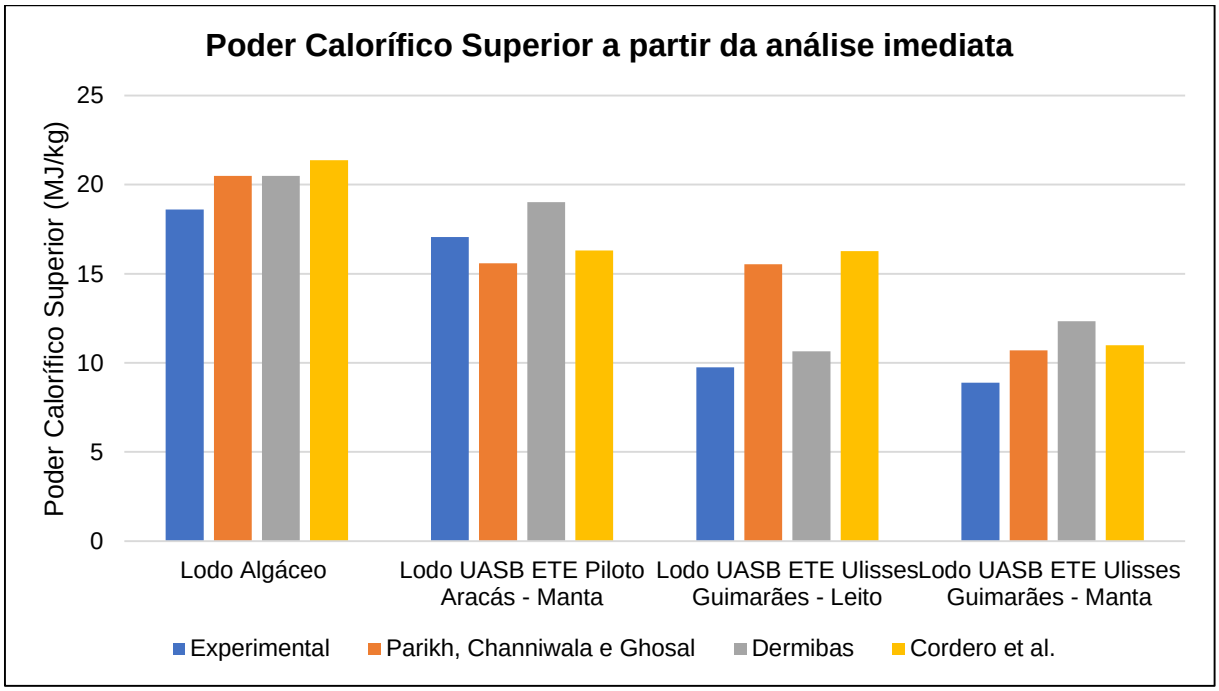

Gráfico 6: Comparação dos resultados do PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise imediata

O PCS do lodo algáceo determinado experimentalmente em base seca foi de 18,61± 0,68 MG/kg, sendo o maior dentre todas as biomassas estudadas como já era esperado, já que não sofreu digestão. Os valores calculados de forma empírica e a partir das Equações de Parikh, Channiwala e Ghosal, Demirbas e Cordero *et al.* foram 20,50 MJ/kg, 20,48 MJ/kg e 21,36 MJ/kg, e erros relativos de 10,13%, 10,04% e 14,79%, respectivamente. O maior poder calorífico do lodo algáceo já era esperado

devido ao alto teor de matérias voláteis e carbono fixo e baixo teor de cinzas. Percebe-se também que os valores obtidos para o lodo algáceo experimental e empírico encontram-se na mesma ordem de grandeza e com erros relativos entre 10 e 15%.

O lodo misto do reator UASB da ETE Araçás apresentou valor experimental de (17,06 ± 1,20 MJ/kg) para a manta. Os valores calculados de forma empírica e a partir das Equações de Parikh, Channiwala e Ghosal, Demirbas e Cordero *et al.* foram, respectivamente, 15,58 MJ/kg com erro relativo de 8,68%, 19,01 MJ/kg e erro relativo de 11,41% e 16,31 MJ/kg com erro relativo de 4,41% para o lodo obtido da manta do reator. Da mesma forma, que a amostra de lodo algáceo, os resultados do PCS experimental e empíricos encontram-se na mesma ordem de grandeza e com erros relativos entre 4 e 16%.

Já as amostras de lodo do UASB da ETE Ulisses Guimarães foram as que apresentaram o menor valor para o PCS, sendo o experimental (9,75 ± 0,84 MJ/kg) para o lodo do leito do reator e (8,88 ± 0,82 MJ/kg) para o lodo da manta do reator. Quanto aos valores empíricos, obteve-se para o lodo obtido do leito do reator UASB os valores de 15,54 MJ/kg (Parikh, Channiwala e Ghosal) com erro relativo de 59,28%, 10,65 MJ/kg (Demirbas) com erro relativo de 9,16% e 16,26 MJ/kg (Cordero *et al.*) com erro relativo respectivo de 66,74%. Para o lodo da manta do reator UASB foram obtidos os seguintes resultados: 10,70 MJ/kg (Parikh, Channiwala e Ghosal) e erro relativo de 20,39%, 12,33 (Demirbas) com erro relativo de 38,80% e 10,98 MJ/kg (Cordero *et al.*) e erro relativo de 23,61%. Verifica-se, como o esperado, que o lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães apresentou o menor valor de PCS, devido ao seu baixo conteúdo de materiais voláteis e carbono fixo, assim como, pela alta geração de cinzas. Além disso, para a biomassa analisada percebe-se que houve casos em que a estimativa do PCS pelo uso de correlações com a análise imediata apresentou erros relativos superiores a 50%.

É importante destacar que apesar de haver casos onde os erros relativos foram altos, o uso de correlações com a análise imediata é uma maneira rápida e fácil de determinar o poder calorífico de biomassas, e poderia ser usada de maneira grosseira.

6.3.2 Poder Calorífico Superior a partir da Análise Elementar

A Tabela 14, Tabela 15 e o Gráfico 7 apresentam os resultados para o PCS obtidos pelas Equações de Dulong, Vandralek e Demirbas, as quais utilizam os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre para determinação do poder calorífico.

Tabela 14: Resultados do PCS médio obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar

Biomassa	**Experimental**		**Dulong**		**Vandralek**		**Demirbas**	
	PCS (MJ/kg)	σ_{PCS}	**PCS (MJ/kg)**	E_r **(%)**	**PCS (MJ/kg)**	E_r **(%)**	**PCS (MJ/kg)**	E_r **(%)**
Lodo Algáceo	18,61	0,68	21,59	16,03	20,48	10,05	19,03	2,25
Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás - Manta	17,06	1,20	19,64	15,13	19,01	11,42	18,11	6,15
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Leito	9,75	0,84	13,64	39,86	10,65	9,20	9,03	7,43
Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Manta	8,88	0,82	12,99	46,26	12,33	38,87	11,71	31,90

Tabela 15: Estatística descritiva dos resultados de PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar

Estatística	**Lodo Algáceo**			**Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás - Manta**			**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Leito**			**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Manta**		
	Dulong	**Vandralek**	**Demirbas**	**Dulong**	**Vandralek**	**Demirbas**	**Dulong**	**Vandralek**	**Demirbas**	**Dulong**	**Vandralek**	**Demirbas**
Número de Amostras	3			3			3			3		
Média (MJ/kg)	21,60	20,48	19,03	19,64	19,00	18,10	13,63	10,64	9,02	12,99	12,34	11,72
Mediana (MJ/kg)	21,58	20,45	19,02	20,21	19,82	19,01	13,63	10,68	9,05	12,28	11,36	10,64
Máximo (MJ/kg)	22,00	20,82	19,32	20,59	19,64	18,62	14,04	10,97	9,31	14,76	13,99	13,31
Mínimo (MJ/kg)	21,20	20,17	18,75	18,12	17,57	16,70	13,24	10,29	8,71	11,92	11,65	11,18
Desvio Padrão (MJ/kg)	0,40	0,33	0,28	1,33	1,25	1,24	0,40	0,34	0,30	1,54	1,44	1,41
Coeficiente de variação (%)	1,87	1,60	1,49	6,76	6,59	6,83	2,95	3,19	3,37	11,88	11,69	12,06

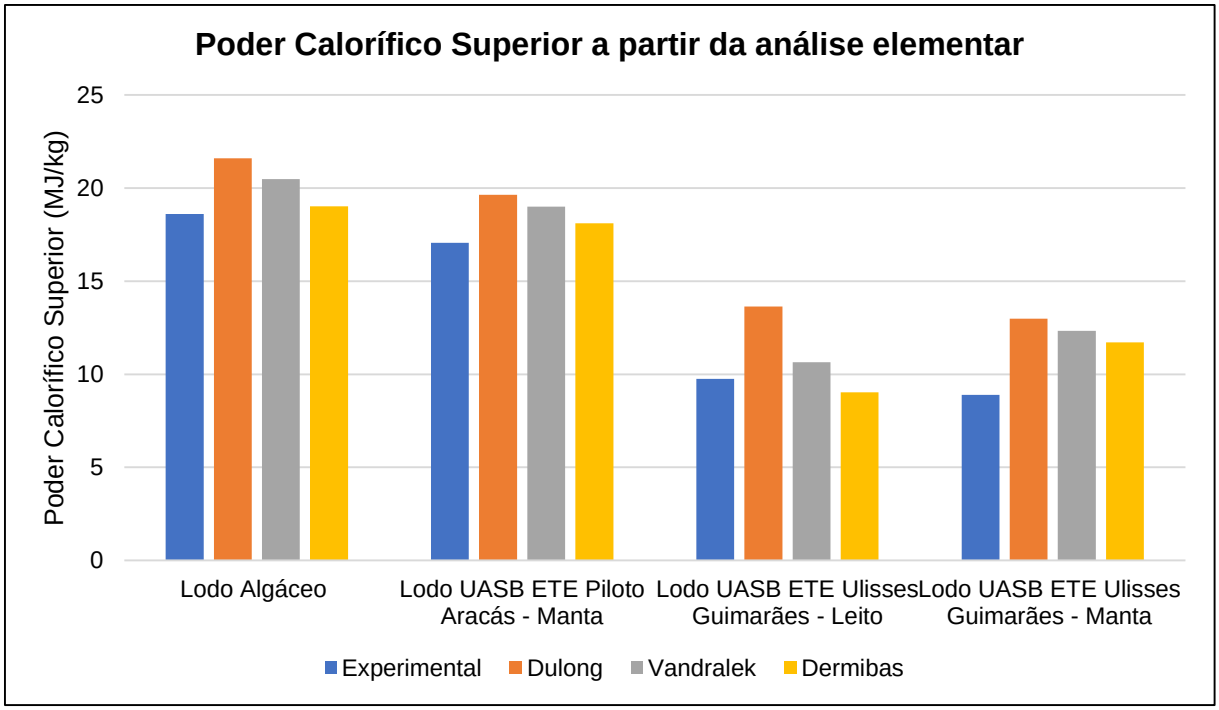

Gráfico 7: Comparação dos resultados do PCS obtidos experimentalmente e a partir de correlações com a análise elementar

De acordo com a Tabela 14, Tabela 15 e o Gráfico 7, verifica-se que as equações que utilizam os teores de C, H, N, O e S, proporcionam resultados maiores que aqueles obtidos experimentalmente, contudo na mesma ordem de grandeza. Além disso, percebe-se para as amostras de lodo algáceo e lodo UASB da ETE Araçás que os erros relativos entre o PCS obtido experimentalmente e o obtido através das equações são menores que 20%. Porém, para as amostras obtidas do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães as equações apresentaram erros relativos maiores, entre 30 e 50%, assim, essas equações não foram satisfatórias para esse tipo de biomassa.

6.3.3 Comparação dos Resultados

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o poder calorífico superior das biomassas estudadas.

Tabela 16: Estatística descritiva dos resultados de PCS experimental para as amostras de lodo analisadas

Estatística	**Lodo Algáceo**	**Lodo misto UASB ETE Piloto Araçás**	**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Leito**	**Lodo UASB ETE Ulisses Guimarães - Manta**
Número de amostras	3	3	3	3
Média (MJ/kg)	18,61	17,06	9,75	8,88
Mediana (MJ/kg)	18,94	16,86	9,47	8,47
Máximo (MJ/kg)	19,07	18,35	10,70	9,83
Mínimo (MJ/kg)	17,82	15,98	9,10	8,35
Desvio padrão (MJ/kg)	0,68	1,20	0,84	0,82
Coeficiente de Variação (%)	3,68	7,03	8,58	9,22

Na Tabela 17 são apresentados valores do poder calorífico superior encontrados na literatura para resíduos de mesma atividade dos estudados no trabalho, como também, de biomassas que já são utilizadas para fins energéticos.

Tabela 17: Poder calorífico superior médio de biomassas encontradas na literatura

Biomassa	**Poder Calorífico Superior (MJ/kg)**	**Referência**
Lodo de Tratamento Aeróbico	22,19 ± 0,06	Pasquini (2014)
Lodo desidratado do Reator UASB após filtro prensa	8,7 ± 1,2	Rosa *et. al.* (2015)
Lodo de RALF seguido de sistema de lodos ativados	20,1 ± 0,6	Borges, Sellin e Medeiros (2008)
Lodo Algáceo	21,29 ± 0,96	Almeida Filho (2016b)
Lodo Algáceo	14 a 21	Demirbas (2004)

Tabela 17: Poder calorífico superior médio de biomassas encontradas na literatura

Biomassa	**Poder Calorífico Superior (MJ/kg)**	**Referência**
Bagaço de cana em briquete	14,5	Arauterm (2008)
Carvão Mineral	23 a 28	Demirbas (2004)
Eucalipto	19,4	Lora e Nascimento (2004)
Madeira de descarte	13	Arauterm (2008)
Madeiras nacionais	19,615	Quirino *et al*. (2005)
Madeira Seca	17,50 ± 2,12	Wang *et al*. (2013)

Observa-se pela Tabela 16 e Tabela 17 que o resultado obtido para o lodo algáceo 18,61 MJ/kg foi abaixo do resultado de 21,29 MJ/kg encontrado por Almeida Filho (2016b), essa diferença pode ser explicada devido o lodo de esgoto ser um resíduo altamente variável, além de que, as microalgas presentes nas lagoas podem apresentar características diferentes, assim como, o processo de tratamento do esgoto. O tratamento do esgoto do trabalho de Almeida Filho foi por lagoas de estabilização, enquanto, que o do presente trabalho foram lagoas de alta taxa. Entretanto, os valores obtidos encontram-se dentro da faixa de 14 a 21 MJ/kg informada por Demirbas (2004) para lodo de algas.

Os resultados de PCS obtidos para a biomassa proveniente do reator UASB da ETE Piloto de Araçás foram de 17,49 MJ/kg, valores maiores que o de 8,7 MJ/kg obtido para lodo de reator UASB desidratado por filtro prensa por Rosa *et al.* (2015). Essa divergência de resultados ocorreu devido ao lodo do reator UASB da ETE Piloto de Araçás ter a presença de microalgas, visto que durante o processo de tratamento da ETE piloto ocorre a recirculação do lodo algáceo proveniente da lagoa de alta taxa e o mesmo é principalmente composto por proteínas, hidratos de carbono, lipídeos e outros componentes secundários, tais como vitaminas ou sais minerais, o que pode ter contribuído para aumento do potencial calorífico do lodo desse reator. Enquanto que, o lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães apresentou os seguintes valores para o PCS de 9,75 MJ/kg (leito) e 8,88 MJ/kg (manta), valores estes próximos aos encontrados por Rosa *et al.* (2015), confirmando assim, que a biomassa constituída por algas apresenta maior poder calorífico.

Observa-se também, a partir da Tabela 16 e Tabela 17, que os valores de poder calorífico encontrados para os lodos de esgoto analisados são menores daqueles encontrados por Pasquini (2014) e Borges, Sellin e Medeiros (2008). Apesar de serem lodos de mesma atividade, ou seja, provenientes do tratamento de esgoto doméstico, as diferenças no tratamento e nas características do efluente podem ter influenciado na diferença entre os resultados obtidos no presente trabalho com as bibliografias encontradas.

Além disso, observa-se que o lodo algáceo e o lodo proveniente do UASB da ETE piloto Araçás apresentam poder calorífico superior ao do bagaço de cana-de-açúcar (14,5 MJ/kg) e da madeira de descarte (13 MJ/kg), e valores próximos ao encontrado para madeira seca (17,50 MJ/kg) por Wang *et al.* (2013). Os valores para todas as biomassas analisadas encontram-se abaixo da faixa de valores encontrada para carvão mineral (23 a 28 MJ/kg), como para a biomassa de madeiras nacionais (19,62 MJ/kg) e eucalipto (19,4 MJ/kg). É importante destacar, a partir dos resultados apresentados, as amostras provenientes da ETE Araçás apresentam potencial para geração de energia. É preciso verificar, no entanto, se a energia demandada na etapa de secagem não inviabilizaria o reaproveitamento da energia do lodo.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho se propôs a analisar o potencial energético do lodo residual proveniente do sistema de tratamento de efluentes por reatores UASB, assim como, do lodo gerado pelo pós-tratamento do efluente do tratamento anaeróbio por lagoa de alta taxa e um lodo misto, obtido no UASB após a introdução do lodo algáceo. Pela análise dos resultados do trabalho, evidenciou-se o potencial da utilização desse tipo de biomassa para a geração de energia, cada qual com sua característica, para ser usado em diferentes aplicações e tecnologias de conversão.

O poder calorífico do lodo proveniente da manta do reator UASB, como também da lagoa de alta taxa da ETE Piloto de Araçás apresentaram poder calorífico superior igual a 17,06 MJ/kg e18,61 MJ/kg, respectivamente. Valores esses muito próximos aos de biomassas diversas como a madeira seca, 17,5 MJ/kg. Dessa forma, tais biomassas podem ser viáveis para o uso como combustível para recuperação de energia. Contudo, o lodo proveniente da ETE Ulisses Guimarães apresentou valores de PCS de 9,75 MJ/kg e 8,88 MJ/kg para a amostra do leito e da manta do reator, evidenciando assim, o menor potencial energético da utilização desse tipo de lodo como combustível.

Contribuindo para a questão do uso energético do lodo, as amostras apresentaram valores em torno de 60% de teor de matéria volátil, com exceção da amostra coletada da manta do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães, que apresentou valores de materiais voláteis de 44%. O material volátil corresponde a parcela orgânica da biomassa que volatiliza rapidamente durante a combustão do lodo, e representa a parcela mais rica em termos energéticos.

Com relação ao teor de cinzas, verificou-se que o lodo proveniente da lagoa de alta taxa apresentou a menor geração de cinzas, em torno de 11%; seguido do lodo resultante do reator UASB da ETE piloto de Araçás em torno de 25% e por fim, o lodo do reator UASB da ETE Ulisses Guimarães, com valores em torno de 25% para a amostra do leito e 48% para a amostra da manta. O teor de cinzas refere-se aos compostos inorgânicos oriundos da geração do esgoto e sua quantificação e caracterização é importante com relação ao gerenciamento desse resíduo, que será produto do processo de conversão termoquímica.

A quantificação do percentual de carbono fixo das biomassas estudadas representa a quantidade de carbono que permanece na forma sólida e possui taxa mais lenta de combustão, permitindo identificar a duração de queima da biomassa. Os valores encontrados estão na ordem de 26% para o lodo algáceo, 15% para o lodo misto do UASB da ETE Araçás (manta) e da ETE Ulisses Guimarães (leito) e 8% para o lodo do UASB da ETE Ulisses Guimarães (manta).

Os resultados da análise elementar das amostras dos lodos analisadas mostraram que quanto ao teor de carbono, o lodo algáceo proveniente da lagoa de alta taxa apresentou o maior valor comparados as demais biomassas analisadas, seguido pelo lodo do reator UASB da ETE Piloto de Araçás, já os menores valores de teor de carbono foram das amostras de lodo da ETE Ulisses Guimarães, assim sendo, sugere-se que a primeira biomassa (lodo algáceo) apresenta um melhor desempenho quanto ao uso do combustível em relação aos demais, análise reforçada pelo menor teor de cinzas resultado do lodo algáceo comparada aos demais.

Dessa forma, conclui-se que um resíduo que geralmente proporciona gastos operacionais em estações de tratamento de esgoto pode se tornar viável para a geração de energia. A utilização do biogás gerado na etapa de tratamento biológico da ETE nos reatores UASB, em que apenas é realizado a sua queima para a transformação do metano em dióxido de carbono e usualmente é descartado, pode ser uma solução adequada para secagem e queima conjunta do lodo. A secagem do lodo nas dependências da ETE reduziria o seu volume, além de deixa-lo em condições favoráveis para utilização do mesmo como biomassa na geração de energia.

É possível ainda, de forma alternativa ou complementar, realizar a conversão termoquímica do lodo agregado a outros resíduos, como por exemplo, casca de arroz, serragem, borra de café e resíduo urbano, tendo em vista, além da recuperação de energia pelo aumento do poder calorífico, o gerenciamento de outros resíduos sólidos, e a redução no teor de umidade na alimentação, já que esse é um dos gargalos para transformar o lodo em energia.

Portanto, o problema na cadeia de gerenciamento do lodo pode ser minimizado e realizado de forma sustentável, de forma a agregar valor ao resíduo, que apresenta características de maneira a ser considerado alternativa futura para geração de energia, proporcionando a diminuição do impacto de sua destinação final.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho realizado e com o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre este assunto, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar estudo acerca da viabilidade econômica da utilização de lodos de estação de tratamento de efluentes como biomassa, considerando a utilização do biogás produzido durante o tratamento do efluente para a secagem do lodo;
- Caracterizar quanto ao potencial energético os lodos obtidos no tratamento de esgoto agregados a outros resíduos sólidos, como por exemplo: casca de arroz, serragem, borra e casca de café, resíduo urbano, entre outros;
- Estudar a utilização das cinzas geradas após o processo de combustão como matéria para a construção civil.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÃO, D. C. **Avaliação físico-química de bio-óleo e biocombustível como aditivo para combustíveis fósseis**. 2006. 67 f. Dissertação (Mestrado em Química dos recursos naturais). Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

ALMEIDA FILHO, O. P. **Poder calorífico superior para combustíveis e resíduos sólidos.** Procedimento operacional. 2016a

ALMEIDA FILHO, O. P. **Valorização energética do lodo algáceo gerado no tratamento de esgoto sanitário.** 2016. 110 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016b.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) - Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), 484 p. 2001. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6).

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 2ª Ed. Brasília. 243 f. 2005.

ANDREOLLI, C. V. (coordenador). **Alternativas de Uso dos Resíduos do Saneamento**. 416p. Curitiba: PROSAB, 2006.

AZEREDO, L. **Potencial energético da co-digestão da biomassa de microalgas no tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomassa & Bioenergy**, n. 38, p. 68-94, 2012.

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 (Science & Engineering Journal), p. 27-32, jan/dez 2008.

BÜTTELBRUN, V. **Avaliação do potencial de uso agrícola de lodo de esgoto na ETE – Rio Negrinho.** Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2004.

CAI, T. PARK, S.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy** Reviews, v.19. p. 360-369, 2013.

CAO, Y.; PAWLOWSKI, A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: brief overview and energy efficiency assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1657-1665, 2012.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5, 380 p. 2007.

COELHO, P.; COSTA, M. **Combustão.** Alfragide, Amadora, PT: Orion, 2012.

CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; RODRIGUEZ-MIRASOL, J.; RODRIGUEZ, J. J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, 80, p. 1567 – 1571, 2001.

CORREIA, J. E. **Caracterização físico-químico e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto Contorno, Feira de Santana, BA.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2009.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; OLIVARES GÓMEZ, E. **Biomassa para energia.** Ed. UNICAMP: Campinas, SP, 2008.

DEMIRBAS, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel.** v. 76. n. 5. p. 431 – 434. 1997.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuel. **Progress in Energy and Combustion Science,** v. 30, n. (2), p. 219-230, 2004.

DEMIRBAS, A. Oil products from masses and algaee via pyrolysis. **Energy Sources**, v. Part A 28, p. 933-940, 2006.

DE SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. Dissertação de Mestrado. EQA/UFSC, Florianópolis, 2005.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de Energia Elétrica – Ano Base 2015.** 2016. Disponível em:<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2018.

FONTS, I.; GEA, G.; AZUARA, M.; ÁBREGO, J.; ARAUZO, J. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2781-2805, 2012.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland**. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GE, H.; GUO, W.; SHEN, L.; SONG, T.; XIAO, J. Biomass gasification using chemical looping in a 25 kWth reactor with natural hematite as oxygen carrier. **Chemical Engineering Journal**, 15, v. 286, p. 174-183, fev. 2016.

GUEDES, C. L. B.; ADÃO, D. C.; QUESSADA, T. P.; BORSATO, D.; GALÃO, O. F., DI MAURO, E.; PÉREZ, J. M. M.; ROCHA, J. D. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 781-786, 2010.

IWAKI, G. **Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs.** Artigo. 2017. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/>, Acesso em: 03 jan. 2018.

JORDÃO E. P.; PESSOA C. A. **Tratamento de esgoto doméstico**. Rio de Janeiro. ABES, 6 Edição, p.969, 2011.

KHAN, A. A.; ZAHID, R.; TYAGIA, V. K.; HURSHEEDA, A.; LEWB B.; MEHROTRA, I.; KAZMI, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v.55, p. 1232-1251, 2011.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a Lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 2008. 193 f. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LEE, E. S. H., SANTOS, F. J. **Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético.** II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IBEAS. Londrina, 2011. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/X-001.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2017.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis.** Editora Interciência. Volume 1. 2012.

LORA, E. E. S,; NASCIMENTO, M. R. N. **Geração termoelétrica: planejamento, projeto e operação**, volume 1. Rio de Janeiro, RJ.: Interciência, 2004.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology,** volume 83, n.1, p. 37-46, mai. 2002.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente. p 109 - 141. 2006.

MOCELIN, C. **Pirólise de lodo de esgoto sanitário: produção de adsorvente e óleos combustíveis.** 2007. 113 f. Dissertação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

MOHAN, D.; PITTMAN JR., C.U.; STEELE, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy Fuels**, 20, p. 848–889, 2006.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e**

Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NUVOLARI, Ariovaldo. **Esgoto sanitário:** coleta transporte, tratamento e reuso agrícola. 2003. 1ª Ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda.

NZIHOU, J. F.; HAMIDOU, S.; BOUDA, M.; KOULIDIATI, J.; SEGDA, B. G. Using Dulong and Vandralek Formulas to Estimate the Calorific Heating Value of a Household Waste Model. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 5, n. 1, jan. 2014.

OLIVEIRA, A. S.; NIKAIDO, M.; CELERE, M. S.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. **Importância do biossólido gerado no sistema de tratamento de esgoto por lodos ativados enfoque para a cidade de Ribeirão Preto.** São Paulo, v. 30, n. 4, p. 634 - 643, out./dez. 2006

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel***,* v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PASQUINI, N.C. Uso potencial como fonte de energia de lodo proveniente de esgoto doméstico e industrial. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.16. n.1, p. 35- 57, jan/jun. 2014.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.

POSADAS, E.; MORALES, M. D. M.; GOMEZ, C.; ACIÉN, G. F.; MUÑOZ, R. Influence of pH and CO_2 source on the performance of microalgae-based secondary domestic wastewater treatment in outdoors pilot raceways. **Chemical Engineering Journal**. v. 265, p. 239-248, 2015.

POKORNA, E.; POSTELMANS, N.; JENICEK, P.; SCHREURS, S.; CARLEER, R.; YPERMAN, J. Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. **Fuel**, v. 88, p.1344-1350, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VILA VELHA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Vila Velha/ES.** 203 f. 2014. Disponível em:

<http://www.vilavelha.es.gov.br/midia/paginas/PMSB%20Vila%20Velha.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2017.

RAZZAK, S. A.; HOSSAIN, M. M.; LUCKY, R. A.; BASSI, A. S.; LASA, H. Integrated CO2 capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing – A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews.** v.27, p.622-653, 2013.

ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Eng. San. Ambiental.** 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522016123321.

SILVA, M. **Aplicação de lodo de estações de tratamento de água como coagulante no polimento final para remoção de fósforo em unidades de tratamento de esgoto.** Dissertação (Mestrado) - Programa Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Univ. de Brasília. Brasília. 2009.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.** 2016. Disponível em: < http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016>. Acesso em: 03 jan. 2018.

SHAO, J.; YAN, R.; CHE N, H.; YANG, H.; LEE, H. D. Catalytic effect of metal oxides on pyrolysis of sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n.9, p. 1113 – 1118, 2010.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Suprimento Energético para Termelétricas. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. (Org.). **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação.** Rio de Janeiro: Interciência. cap. 2, v.1, 2004. p. 31-86.

TORRES, H. S. J. **Cultivo de microalgas em efluente de tratamento anaeróbio de esgoto**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Univ. Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição Final de Biossólido. São Paulo – SABESP, 2001.

VASQUES, A. R. **Caracterização de adsorventes obtidos por combustão e pirólise de lodo residual e aplicação no tratamento de efluentes têxteis**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** 2012. 72 f. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2012.

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica.** 2004. 181 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica). Departamento de Química Orgânica. Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2004.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions**. Vol. 1. IWA Publishing, 2005.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) - Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), 2001.

VON SPERLING, M. **Princípios de tratamento biológicos de águas residuárias**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 1, 3 ed., 452p.; 2005.

YAAKOB, Z. K. F.; EHSAN, A. S. R. S. ABDULLAH, M. S. T. An overwiew of microalgae as a wastewater treatment **Jordan International Energy Conference.** 2011. v.4, p.620-639.

WANG, K.; BROWN, R. C.; HOMSY, S.; MARTINEZ, L.; SIDHU, S. S. Fast pyrolysis of microalgaee remnants in a fluidized bed reactor for bio-oil and biochar production. **Bioresource Technology,** v. 127, p. 494-499, 2013.

WERLE S., WILK R. K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. **Renewable Energy**. 2010. v. 35. p. 1914–1919.