

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
BACHARELADO EM QUÍMICA

Jonatan Brum

**PIRÓLISE DO LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO  
DOMÉSTICO - ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO FINAL**

Porto Alegre

2017

Jonatan Brum

**PIRÓLISE DO LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTO  
DOMÉSTICO - ALTERNATIVA PARA DISPOSIÇÃO FINAL**

Trabalho de conclusão apresentado junto a disciplina  
“Trabalho de Conclusão de Curso – QUI” do Curso  
de Química, como requisito parcial para obtenção  
do grau de Bacharel em Química

Prof. Dr. Renato Cataluña Veses  
Orientador

Porto Alegre

2017

Dedico este trabalho aos meus familiares, pela compreensão e paciência.

Agradeço ao meu orientador, o Dr. Renato Cataluña Veses por oportunizar esta etapa conclusiva da minha graduação. Agradeço à Dra. Michele Oberson de Souza por aceitar participar da banca. Agradeço ao doutorando, Zeban Shah pelo apoio no laboratório. Agradeço a Adriana Cechin, coordenadora no DMAE pela disposição e colaboração no material. Quero agradecer finalmente ao pessoal do Laboratório Green Lab pelas análises.

## RESUMO

A crescente demanda energética mundial, seus efeitos no clima e as consequências de um possível esgotamento das reservas de petróleo estão na pauta de vários centros de governo e departamentos voltados à pesquisa tecnológica. As pesquisas por fontes energéticas baseadas no emprego de biomassa têm se mostrado muito promissora e interessante neste sentido. O destino adequado dos sólidos estabilizados provenientes das estações de tratamento de esgotos (ETEs), tem sido motivo de preocupação de muitas localidades. Uma alternativa atraente sob o ponto de vista tecnológico é o emprego do lodo como matéria prima no processo de pirólise, gerando produtos mais inertes com potenciais aplicações em engenharia, agricultura e como fonte de energia renovável. Os produtos da pirólise são influenciados pela composição da biomassa, no caso dos materiais lignocelulósicos, e pela origem do Lodo. O aumento do teor de metais proveniente das cinzas favorece a formação de carvão em detrimento das fases líquidas e gasosas. O objetivo é promover a pirólise de Lodo de esgoto desidratado e a incineração do carvão, diminuindo o volume de rejeito. O Lodo pirolisado gerou 75% de carvão com elevado teor de cinzas e 35% de aquosos condensáveis e voláteis não combustíveis, sob temperatura de 800°C.

**Palavras-chave:** pirólise, incineração, lodo de esgoto, cinzas.

## SUMMARY

The growing global energy demand, its effects on the climate and the consequences of a possible depletion of the oil reserves are on the agenda of several centers of government and departments focused on technological research. Research on energy sources based on the use of biomass has been very promising and interesting in this sense. The adequate fate of stabilized solids from sewage treatment plants (ETEs) has been a concern of many localities. Another attractive alternative from a technological point of view is the use of sludge as a raw material in the pyrolysis process, generating products destined to civil construction, rendering possible contaminants inert and also coal for a wide range of purposes. The products of pyrolysis are influenced by the composition of the biomass. In lignocellulosic materials, the increase in the content of metals from the ash favors the formation of coal in detriment of the liquid and gas phases. The objective is to promote the pyrolysis of dehydrated sewage sludge. The pyrolyzed sludge generated 75% of coal and 35% under a temperature of 800 °C the fractions obtained being non-combustible material.

**Keywords:** pyrolysis, incineration, sewage sludge, ash.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Concepção de uma refinaria de bio-óleo	30
FIGURA 2- Rendimentos típicos em base seca para pirólise rápida da madeira em função da temperatura.	31
FIGURA 3- Esquema conceitual do processo de pirólise rápida.	33
FIGURA 4- Conjunto modular UNITANK	39
FIGURA 5- Diagrama do tratamento ETE Serraria	41
FIGURA 6- Foto do Aparato de Pirólise	44
FIGURA 7- Fluxograma do processamento térmico de Inertização, Pirólise e Incineração	46

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Produção típica de Lodos para vários processos de tratamento	18
TABELA 2 - Produção de Lodos em ETEs	19
TABELA 3 – Propriedades dos tijolos executados com cinzas de Lodo (TAY,1987)	24
TABELA 4 - Composição dos gases da pirólise de lodo de esgoto a 500 °C	26
TABELA 5 – Variantes do processo de pirólise	29
TABELA 6 – Rendimentos das frações orgânicas, carvão, água e gás resultantes dos processos de pirólise de Lodos de esgotos doméstico e industrial	35
TABELA 7 – Rendimento das fases de pirólise de Lodo	35
TABELA 8 – Composição dos gases da pirólise de Lodo de esgoto à 500°C	36
TABELA 9 – Condições do afluente e do efluente	40
TABELA 10 – Balanço de Massa ETE Serraria	42
TABELA 11 – Principais resultados	46
TABELA 12 – Teor de Cinzas para Oxidação à 750°C	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
Cox - Carbono oxidado  
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CFB - Circulating Fluid Bed  
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DBO5 - Demanda Bioquímica de Oxigênio (incubação por 5 dias)  
DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto  
DQO - Demanda Química de Oxigênio  
ETE - Estação de tratamento de esgoto  
FCC - Fluid Catalytic Cracking  
IWC - Institute for Wood Chemistry  
Kg SS/d – Kilograma Sólidos Suspensos / dia  
LG - Levoglucosan  
LGona - Levoglucosenona  
LM - Lodo Misto  
LQ – Limite de Quantificação  
OL - Lodo Óleo  
m<sup>3</sup>/d - Metro cúbico / dia  
mg SS /L - miligramas de Sólidos Suspensos / Litro  
MJ/Kg - Mega Joule / kilograma  
MJNm<sup>-3</sup> - Mega Joule.Newton/ metro cúbico  
MPa - Mega Pascal  
NBR - Norma Brasileira  
ND - Não Detectado  
PBP - Packet Bed Pyrolyser  
PT - Fósforo Total  
Q - Vazão

RTP - Rapid Thermal Processing

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná

SST - Sólidos Suspensos Totais

TKN - Nitrogênio Total Kjeldahl

UASB - Upflow Anarerobic Sluodge Blanket

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b>	<b>14</b>
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
<b>3.1.1 A Produção de Lodo</b>	<b>14</b>
3.1.1.1 O Lodo e as fases de tratamento	15
3.1.1.2 O Lodo segundo o critério teor de umidade	17
3.1.1.3 Formas de processamento do Lodo	18
3.1.1.4 Adensamento	20
3.1.1.5 Digestão	20
3.1.1.6 Desidratação	21
3.1.1.7 Incineração	23
<b>3.1.2 Disposição de Resíduos Sólidos: Aterros Sanitários e Temática Ambiental</b>	<b>26</b>
<b>3.1.3 O Processo de Pirólise</b>	<b>28</b>
3.1.3.1 A pirólise rápida	31
3.1.3.2 A pirólise empregando lodo de esgoto	33
<b>3.1.4 O Local da Coleta</b>	<b>37</b>
<b>3.1.5 Generalidades do sistema de tratamento ETE Serraria</b>	<b>37</b>
3.1.5.1 Tratamento preliminar	38
3.1.5.2 Tratamento anaeróbio	38
3.1.5.3 Tratamento aeróbio	39
3.1.5.4 Desidratação	40
3.1.5.5 Balanço de Massa ETE Serraria	42
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	43
<b>3.2.1 A coleta do lodo</b>	<b>43</b>

	11
<b>3.2.2 O preparo da amostra</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3 A pirólise do lodo</b>	<b>44</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>45</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>

## **1 INTRODUÇÃO.**

A necessidade cada vez maior dos grandes centros urbanos em atender as metas de saneamento básico demanda atenção e investimentos constantes, não somente pela premissa oriunda das políticas de saúde públicas em oferecer ao cidadão serviços básicos e de qualidade, como também pela preocupação em mitigar a pressão sobre o meio ambiente provocados pela expansão deste tipo de serviço.

As pesquisas por tecnologias que tornem rejeitos urbanos adequados como insumos energéticos vai ao encontro do apelo pelas soluções polivalentes, que abarcam a temática ambiental e energética sob o enfoque da geografia das grandes cidades.

O destino adequado dos rejeitos urbanos, em especial os sólidos estabilizados provenientes das estações de tratamento de esgotos (ETEs), tem sido motivo de preocupação de muitas localidades. A disposição incorreta destes materiais pode comprometer seriamente a qualidade dos mananciais de água, proliferando doenças, disseminando metais pesados além de outros compostos com potencial bioacumulativo. Prática mais comum utilizada para destinar o lodo ativado, a disposição em aterros devidamente conveniados, começa a ser preterida por outras práticas que contornem ou resolvam os passivos ambientais oriundos do esgotamento físico dos aterros sanitários. A incineração e a desinfecção para posterior utilização como insumo agrícola já estão em prática em alguns países. Outra alternativa atraente sob o ponto de vista tecnológico é o emprego do lodo como matéria prima no processo de pirólise. Neste processo ocorre a degradação térmica da matéria orgânica, tanto sob condições de ausência de um agente oxidante como também em baixas concentrações, evitando a oxidação violenta do insumo. O processo de pirólise possui grande potencial como alternativa energética uma vez que pode produzir o bio-óleo, uma mistura de hidrocarbonetos capaz de substituir o diesel mineral.

## **2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem por objetivos gerais analisar a viabilidade do processo de pirólise convencional como alternativa às atuais práticas de inertização do lodo de estação de tratamento de esgoto, proveniente do sistema de desidratação de lodo, de forma a diminuir o passivo ambiental relacionados à destinação e codisposição dos rejeitos sólidos. Através de uma revisão na literatura abordamos os aspectos técnicos do processo de pirólise da biomassa com vistas a compreensão dos fenômenos que influenciam esta ferramenta como promissora geradora de combustíveis alternativos e insumos derivados do tratamento térmico dos Lodos de esgoto.

Como objetivos específicos, avaliamos as questões pertinentes à produção do Lodo do sistema de tratamento de efluente domésticos e suas características operacionais. Apresentamos as principais práticas de disposição dos resíduos sólidos e sua influência na problemática envolvendo as demandas de meio ambiente e saúde pública, em especial, o esgotamento da capacidade dos aterros sanitários. Destacamos as vantagens do processo de pirólise como técnica de tratamento eficiente dos rejeitos com potencial de contaminação biológica e química. Por fim, analisamos a composição das cinzas originadas da incineração do coque produzido no processo de pirólise quanto aos principais componentes metálicos presentes, com perspectivas ao aproveitamento dos subprodutos gerados como insumo em materiais de alvenaria estrutural.

### **3 DESENVOLVIMENTO**

#### **3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

##### **3.1.1 A Geração de Lodo**

O esgoto, segundo Chagas (2000), é o termo em uso para caracterizar o efluente gerado nas várias atividades que demandam o emprego da água com fins doméstico, industrial, comercial, hospitalar, agrícola, utilidade pública, áreas de superfície e infiltração, pluvial, entre outras. O esgoto é constituído por líquido contendo cerca de 99,9% de água e 0,1% de substâncias minerais e orgânicas em dissolução e em suspensão (BETTIOL; CAMARGO, 2000). A fração sólida do esgoto é constituída geralmente de 70% de uma mistura de carboidratos, proteínas e gorduras e 30% areia, sais e metais. Em função do processo que é dado ao afluente que é coletado pelo sistema responsável por captar o esgoto até a unidade de tratamento, é gerado o rejeito sólido com características próprias, chamado lodo de esgoto.

O lodo proveniente do processo de tratamento do esgoto pode receber ainda a denominação de biossólido que, segundo Water Environment Federation – WEF (1996), caracteriza produtos orgânicos gerados nos processos de tratamento de esgoto que, submetidos à processos de estabilização química, física ou biológica, podem ser empregados com determinada finalidade benéfica. O termo lodo é empregado quando este ainda não recebeu qualquer processo de beneficiamento visando outra destinação que não seja a de resíduo sólido para aterro sanitário.

A geração de lodo é uma consequência originada das demandas de saneamento básico estabelecidas nos centros urbanos, visando o cumprimento de requisitos fundamentais de saúde pública. A forma mais eficaz de prevenir doenças e ofertar uma maior qualidade de vida para a população consiste em manter sistemas de abastecimento de água e seus subsequentes sistemas de coleta e tratamento de esgoto.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2002) relata a vantagem econômica e social, segundo a Associação Nacional dos Serviços Municipais – ASSEMAE, o setor público economiza R\$ 4 em medicina curativa para cada R\$ 1 investido em saneamento. O tratamento de água e esgoto impacta social e

economicamente o conjunto da sociedade de forma tão abrangente, sendo assim considerada um serviço essencial ofertados por agentes públicos e privados.

#### 3.1.1.1 – O Lodo e fases de tratamento

No campo de tecnologias para o tratamento de esgotos sanitários, a escolha entre as diversas alternativas disponíveis é ampla e depende de diversos fatores, entre eles: a área disponível para implantação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE); topografia dos possíveis locais de implantação e das bacias de drenagem e esgotamento sanitário; volumes diários a serem tratados e variações horárias e sazonais da vazão de esgotos; características do corpo receptor de esgotos tratados; disponibilidade e grau de instrução da equipe operacional responsável pelo sistema; disponibilidade e custos operacionais de consumo de energia elétrica; clima e variações de temperatura da região; disponibilidade de locais e/ou sistemas de reaproveitamento e/ou disposição adequados dos resíduos gerados pela ETE ( SÃO PAULO, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, CETESB, 1988).

Conforme descrição de OLIVEIRA (2006, p.58), o tratamento pode ser dividido em níveis, tendo como critério o grau de remoção de poluentes:

- O tratamento primário, responsável pela remoção de sólidos grosseiros em suspensão (materiais de maiores dimensões e sólidos decantáveis como areia e gordura), o que protege as unidades de tratamento subsequentes e dispositivos de transporte (bombas, tubulações), além de proteção dos corpos receptores. São utilizados apenas mecanismos físicos: gradeamento e sedimentação por gravidade;
- O tratamento secundário, geralmente constituído por reator biológico, remove grande parte da matéria orgânica, podendo remover parcela dos nutrientes como nitrogênio e fósforo. Os reatores biológicos empregados para essa etapa do tratamento reproduzem os fenômenos naturais da estabilização da matéria orgânica que ocorreriam no corpo receptor;

- O tratamento terciário, nem sempre presente, geralmente constituído de unidade de tratamento físico-químico, tem como finalidade a remoção complementar da matéria orgânica, dos nutrientes, de poluentes específicos e a desinfecção dos esgotos tratados.

Conforme relata DAVID, (2002), os Lodos são classificados conforme suas fases de origem:

- O Lodo primário originado em decantadores ou flotadores do tratamento primário, apresenta comumente uma concentração de sólidos de 3%. O adensamento é necessário para diminuir o volume e aumentar a eficiência do processo de tratamento para as fases seguintes. Usa execução é relativamente fácil com emprego de adensadores que operam por gravidade, atingindo concentração de sólidos entre 4% e 10%. Como características peculiares, apresenta emanção de fortes odores, concentração alta de agentes biológicos patogênicos e altamente putrescível. Em procedimentos operacionais e no manuseio dos equipamentos que são dispostos nesta fase é exigido o uso de óculos de proteção, luvas, máscaras e roupas que ofereçam proteção ao pessoal de serviço devido ao risco de contaminação.
- O Lodo secundário é proveniente dos processos de estabilização biológica, onde bactérias e demais microrganismos digerem o Lodo primário como fonte de carbono e nutrientes. Também sofre processo de adensamento, normalmente por gravidade, tanto em processos anaeróbios, como aeróbios, contudo de precipitação mais difícil que o Lodo primário, sendo necessário agentes de coagulação ou tempo mais longo para gerar um adensamento satisfatório. O percentual de sólidos fica entre 1% e 6%

### 3.1.1.2 – O Lodo segundo o critério teor de umidade.

Os projetos de estações de tratamento de esgoto sanitário têm sofrido mudança de enfoque de forma gradual ao longo da última década, conforme LUDOVICE et al. (1995). Existe uma tendência mundial pela adoção de processos que originam um Lodo mais seco, com vistas a facilitar o transporte e manejo pela redução de volume produzido, de acordo com GEYER (2001).

O Lodo, conforme o processo em que é gerado, apresenta diferentes percentuais de umidade, de maneira que recebe uma classificação por parte do meio técnico e das Companhias de Saneamento Básico (DMAE, 1978, DMAE, 1996 e SANEPAR, 1994), afim de melhor compreender suas propriedades relativas ao processo. São elas:

- Lodo “in natura” é aquele retirado logo após o processo de tratamento de esgotos e que apresenta 98% de umidade;
- Lodo parcialmente desidratado é aquele que passou por processo de desidratação, tanto mecânico como natural, geralmente a técnica de centrifugação ou secagem em leito a céu aberto, apresentando aparência de material seco, mas ainda com umidade entre 30% e 50%;
- Lodo seco é o material que apresenta 99% de sólidos, gerado por processos que não são usuais no tratamento de esgotos, mais sim em processos de secagem por estufas, com o objetivo analítico de laboratório e em pequenas quantidades;
- Lodo incinerado é aquele obtido tanto a partir do lodo desidratado como do lodo seco, normalmente em temperaturas entre 550°C e 950°C. Também recebe a denominação de Cinza de Lodo Sanitário ou Cinza de Lodo.

Conforme relato de DAVID (2002, p. 7), em sistemas de tratamento de esgotos que operam unidades de Lodos ativados, um valor típico de produção situa-se em 50 gramas por dia por habitante. A Tabela 1 apresenta valores de produção de Lodo típicos.

Tabela 1- Produção típica de lodos para vários processos de tratamento.

Processo de tratamento	Densidade* do lodo	Sólidos secos (Kg /m <sup>3</sup> )	
		Faixa	Valor típico
Decantação primária	1,02	0,106 - 0,165	0,147
Lodo ativado	1,005	0,070 - 0,094	0,082
Filtro biológico	1,025	0,060 - 0,094	0,070
Aeração prolongada	1,015	0,082 - 0,118	0,094
Lagoa aerada	1,01	0,082 - 0,118	0,094

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (1991)

\* Densidade relativa:  $\rho$  objeto/ $\rho$  referência.

### 3.1.1.3 - Formas de processamento do Lodo.

Segundo ANDREOLI (1999), os Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos através de processos físicos ou biológicos apresentam odores desagradáveis, presença de microrganismos patogênicos, elementos tóxicos de origem orgânica e mineral e dificuldade de desidratação, o que dificulta a sua manipulação e processamento.

A estabilização refere-se às tecnologias onde se utilizam aditivos ou processos para alterar o estado físico do resíduo, o que facilita o manuseio, o acondicionamento, o transporte e a disposição final do mesmo e principalmente, torná-lo menos tóxico por imobilização física e/ou química dos constituintes do resíduo (CLAUDIO, 1987; BARTH et al., 1990).

Portanto, a estabilização tem como objetivos: melhorar as características físicas e de manuseio, diminuir a área superficial através da qual possa ocorrer a transferência ou perda de poluente, limitar a solubilidade ou destoxificar quaisquer constituintes perigosos contidos no resíduo (PAVAN, 1985).

As técnicas hoje existentes têm possibilitado a utilização normal das seguintes etapas de tratamento dos Lodos: o adensamento, a digestão, a desidratação e, em alguns casos, a incineração. A adoção destas quatro fases de tratamento, ainda não são suficientes para se obter o material satisfatoriamente estabilizado,

o que tem requerido que, após o tratamento, o material seja ainda processado para que possa ter uma disposição final segura e estável (MATCALF e EDDY 1991).

Segundo ALEM SOBRINHO (2001) no processo de Lodo ativado sem digestão podem ser gerados 95 gramas de sólidos suspensos totais por dia por habitante, quando da estabilização do Lodo desidratado com cal. O mesmo autor cita valores de produção de Lodos para vários processos convencionais (Tabela 2).

O princípio geral deste processo é acelerar a oxidação e decomposição natural da matéria orgânica, o mesmo que acontece nos corpos d'água (matéria orgânica é a parte convertida em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) (FERREIRA e CORAIOLA, p.261, 2008).

Os sistemas de lodos ativados consistem de uma complexa associação de micro-organismos composta por bactérias, protozoários, fungos e micrometazoários que oxidam os compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos efluentes (BENTO et al, 2005; DAVIES, 2005).

Tabela 2 - Produção de lodos em ETEs.

<b>Processo de tratamento</b>	<b>Produção de lodo (g SST / habitante.dia)</b>
Lodo ativado convencional	35 - 40
Reator UASB	15 - 20
Lagoa aerada	15 - 25
Filtro biológico	35 - 40
Lodo ativado sem digestão	65 - 70

Fonte: Adaptado de ALEM SOBRINHO (2001)

#### 3.1.1.4 – Adensamento

Conforme relato de GEYER (2001), o adensamento de Lodo é o início da eliminação do excesso de água e tem por finalidade a concentração dos sólidos, realizada normalmente em tanque que operam por gravidade com profundidade não inferior a 3m.

Para permitir uma melhor estabilização do Lodo, dentro do processo de tratamento, pode-se utilizar a desestabilização química, que consiste na adição de substâncias químicas ao Lodo (FARREL, 1974; METACALF e EDDY, 1992).

Segundo MALINA (1993), uma definição de estabilização do Lodo:” transformação parcial do Lodo por agentes químicos, físicos ou biológicos de modo que a maior parte putrescível do Lodo seja destruída ou inativada, o que torna o resíduo inócuo”.

Esta etapa ocorre antes da desidratação por centrifugação, filtração a vácuo, filtração com filtro de placas e filtração com filtro cinta (CARCERES, 1993).

Cloreto férrico, cal hidratada, cal, sulfato de alumínio, sulfato ferroso e sulfato férrico podem ser usados para melhorar processos de filtração, sedimentação e centrifugação segundo descrição de GEYER, (2001).

#### 3.1.1.5 – Digestão

Tanto países em desenvolvimento, que possuem baixo poder aquisitivo, como também nações desenvolvidas, que apresentam pequenas áreas disponíveis em seus centros urbanos podem fazer uso desta tecnologia anaeróbia (ABREU, ZAIAT, 2008, p. 181).

Segundo IMHOFF (1996), a decomposição anaeróbia é o processo de digestão mais empregado para Lodo Sanitário, que conduzido sob condições controladas, têm por finalidades:

- Redução ou destruição dos patógenos;
- Redução e estabilização da matéria orgânica dos Lodos úmidos;
- Redução do volume de Lodos;
- Facilitar a secagem dos Lodos;

- Produção e aproveitamento do biogás.

Ainda de acordo com IMHOFF (1996), a digestão é influenciada por uma série de condições, a saber:

- Inoculante para o equilíbrio do processo de digestão, consistindo de Lodo fresco adicionado diariamente ao Lodo digerido;
- O pH favorável entre 7,0 a 7,4, sendo necessária a correção com álcalis para do devido ajuste;
- Temperatura: para digestão mesófila faixa de 30°C a 40°C e para digestão termófila 45°C a 57°C. O período de retenção nos digestores primários apresenta dependência com a temperatura: 15°C – 55 dias, 20°C – 45 dias, 25°C – 35 dias, 30°C – 28 dias, 35°C – 25 dias.
- Agitação para promover a mistura dos Lodos em digestão com os Lodos frescos, acelerando o processo e conferindo melhora. Agitadores mecânicos, recirculação de Lodos e injeção de gases por compressores são empregados com esta finalidade;
- Redução do volume de Lodos com a digestão são evidentes quando comparadas suas relações volumétricas Lodo digerido/ Lodo fresco: 1 no Lodo fresco, 0,34 por precipitação química, por filtração biológica 0,32 e nos Lodos ativados digeridos de 0,41.

#### 3.1.1.6 – Desidratação

A desidratação tem como finalidade a redução do volume de Lodo, visando facilitar o processo de transporte, tanto para destinação final como para possíveis usos como insumo. São empregadas várias técnicas para este fim, sendo as mais adotadas:

- Lagoas de Lodo: de acordo com GEYER (2001, p.31 ), depressões naturais ou terrenos escavados onde os Lodos são depositados para a secagem natural. Prática vem sendo abandonada em função da contaminação do solo e demais conseqüências correlatas;

- Leitões de secagem: conforme relato de GEYER (2001, p.31 ), espaços com infraestrutura projetada para este fim, permitindo uma secagem eficiente. O método mais antigo e barato, com leito inclinado e piso drenante, onde os lixiviados são novamente conduzidos ao processo de tratamento da ETE. O contato com a radiação solar e o ar atmosférico promove a secagem natural, permitindo uma eficiência de 70% na desidratação. Porém esta técnica é desvantajosa em regiões com índice pluviométrico elevado.
- Centrifugação: conforme relato de GEYER (2001), as centrífugas são equipamentos que operam de forma contínua na desidratação de Lodos. Neste equipamento, um tambor cilíndrico de extremidade cônica gira em alta velocidade, sendo este tambor dotado de um parafuso concêntrico com o eixo de rotação, que por sua vez gira em velocidade diferente. O movimento do material ao longo do cilindro surge em função da velocidade relativa entre o tambor e o parafuso, sendo a umidade expulsa por forças centrífugas. AISSE et al. (1998) relataram resultados para vários tipos de Lodos, onde chegou-se a 73,6% de teor de umidade da torta.
- Filtro prensa de placas e quadros: conforme GEYER (2001) este dispositivo é constituído por uma série de placas verticais de maior espessura nas bordas, revestidos de malha filtrante em ambos os lados. São ajustados umas contra as outras de forma que o Lodo ao ser bombeado para o interstício das placas provoque o aumento gradual de pressão, resultando na filtragem do material. As placas ao serem afastadas liberam tortas de material. Sua eficiência em desidratar Lodos situa-se entre 50% e 70%.
- Filtro prensa de cinta: conforme GEYER (2001) no filtro prensa de cinta o Lodo é introduzido continuamente entre duas correias que se deslocam entre roletes. O processo inclui três estágios operacionais básicos: o condicionamento do Lodo; drenagem gravitacional e desidratação por compressão. Na zona de desidratação o Lodo é submetido a pressões

crescentes à medida que avança entre os roletes. Na extremidade, uma lâmina remove o Lodo seco (GEYER, 2001).

- Filtros à vácuo: promovem a desidratação do Lodo por meio da diferença de pressão entre dois meios filtrantes, geralmente um tecido sintético permeável, alojados em tambores metálicos, conforme relato de GEYER, 2001. Este sistema apresenta uma eficiência de 50% a 70% (DMAE, 1996).

### 3.1.1.7 – Incineração

A incineração promove a queima dos resíduos como parte do processo de tratamento, com vistas a redução do volume, inertização de possíveis contaminantes biológicos e oxidação de metais pesados remanescentes.

A incineração e processos correlatos (oxidação úmida, entre outros) é considerada por alguns autores como uma etapa do tratamento dos Lodos (AZIZ e RAMASWAMY, 1992; SAITO, 1994) e por outros como uma das alternativas de disposição final do resíduo (KANEZASHI e MURAKAMI, 1991).

No tratamento de resíduos municipais, em especial os das grandes cidades, a incineração tem sido a principal alternativa segundo AZIZ e RAMASWAMY (1992). Lixo e Lodos são reduzidos a formas mais inertes se comparados aos seus estados originais, tornando a incineração, do ponto de vista sanitário, a forma mais segura de tratamento segundo SAITO (1994).

SAUTEREY (1978) indica a Engenharia Civil como a atividade tecnológica mais apropriada para absorver resíduos, em virtude do volume de recursos naturais que demanda. De acordo com relato de GEYER (2001, p. 6) estudos têm sido realizados quanto ao aproveitamento do Lodo Sanitário na produção de blocos cerâmicos (ALLEMAN e BERMAN, 1984; TAY, 1987, TRAUNER, 1991 e WIEBUSCH e SEYFRIED; 1997).

TAY (1987) propôs o aproveitamento dos resíduos de ETEs na fabricação de tijolos empregando as cinzas do processo de incineração, à temperatura de 600°C, misturadas nas proporções em massa de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% na argila, onde avaliou as propriedades mecânicas e físicas dos produtos (Tabela 3).

Tabela 3 - Propriedades dos tijolos executados com cinzas Lodo (TAY, 1987).

<b>Tijolo com cinza de Lodo (% de cinza)</b>	<b>Massa específica (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência a compressão (MPa)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Fissuras por secagem na queima dos tijolos (%)</b>
<b>0</b>	2,38	8,72	0,03	9,91
<b>10</b>	2,42	8,75	0,07	9,55
<b>20</b>	2,46	8,00	0,11	9,10
<b>30</b>	2,50	7,07	1,39	9,36
<b>40</b>	2,55	7,05	1,52	9,79
<b>50</b>	2,58	6,69	1,70	10,51

Fonte: Adaptado de GEYER (2001, p. 76).

Conforme relato de GEYER (2001, p.35,) os equipamentos geralmente mais empregados na incineração são:

- Fornos de múltiplos estágios: estruturas verticais metálicas de vários andares, onde o material a ser incinerado é introduzido na parte superior e, por meio de dispositivos mecânicos de transporte, é conduzido gradativamente aos estágios inferiores. Ar aquecido é introduzido no sistema de baixo para cima, onde no topo ocorre a prévia secagem, na parte intermediária a queima de maior temperatura e no estágio inferior o resfriamento e coleta das cinzas. Suas temperaturas de operação geralmente se distribuem da seguinte forma: estágio superior 550°C, estágios intermediários 700°C a 1.000°C e estágio inferior 350°C.

- Fornalhas de leito fluidizado: constituído de um recipiente contendo um leito de areia onde ficam depositados os resíduos que recebem um jorro de ar aquecido, normalmente com temperaturas na faixa de 800°C. O fluxo de gases é ascendente e o material flui por entre a areia à medida que vai se volatilizando.

O tipo de incineração que vem sendo mais utilizado é o forno de múltiplos estágios, devido à eficiência, alta capacidade de incinerar e possibilidade de controle de emissão de gases na atmosfera (ACE PLAN, 1990).

Não existem ainda procedimentos específicos para a queima de Lodos sanitários (GEYER, 2001, p.44). METCALF e EDDY (1992) observam que entre temperaturas de 550°C até 950°C normalmente empregadas em processos de incineração de Lodo não promovem variações significativas nos resíduos produzidos.

Na Tabela 4 são mostradas as composições químicas dos Lodos incinerados à 550°C, para os principais compostos presentes nas cinzas, originados de cinco localidades: ETE Pinheiros de São Paulo, ETE IAPI de Porto Alegre, ETE Tsukuda e ETE Shiga do Japão e ETE Hannover da Alemanha.

Os principais compostos das cinzas, conforme relato de GEYER (2001, p.45) perfazem entre 72% e 93% do total dos compostos presentes nos diferentes Lodos apresentados.

TABELA 4 – Composição dos Lodos incinerados à 550°C

	Composição Química							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>ETE Pinheiros</b> <sup>(1)</sup> (%)	51,74	26,58	6,51	4,57	1,69	1,76	0,37	1,33
<b>ETE IAPI</b> <sup>(2)</sup> (%) (média de 1982 1992)	55,2	13,00	3,00	0,28	ND	0,90	ND	ND
<b>ETE Tsukuda</b> <sup>(3)</sup> (%)	51,9	15,6	7,3	6,2	9,2	2,3	0,4	0,6
<b>ETE Shiga</b> <sup>(4)</sup> (%)	46,6	26,0	5,0	8,6	2,39	2,1	1,2	0,7
<b>ETE Hannover</b> <sup>(5)</sup> (%)	36,2	14,2	5,6	10,0	1,50	1,5	0,7	1,2

(1)(SARDINHA e MORINCO, 1992)

(4)(OKUNO, et al, 1997)

(2)(WALDEMAR, 1992)

(5)(WIEBUSH e SEYFRIED, 1997)

(3)(ENDO, et al, 1997)

Fonte: Adaptado de GEYER (2001, p.45).

De acordo com GEYER, RECENA e SCHÜLER (1995), as cinzas são torrões de aparência avermelhada, devido à presença de óxidos de ferro e de partículas silicosas, e de características friáveis, o que é constatado ao tato.

### 3.1.2 – Disposição de Resíduos Sólidos: Aterros Sanitários e Temática Ambiental.

A poluição ambiental pode ser definida como toda ação ou omissão do homem que, através da descarga de material ou energia nas águas, solo e ar, cause um desequilíbrio nocivo no meio ambiente (VALLE, 1995). Nesse contexto, o aumento na quantidade e variedade dos resíduos sólidos gerados pelas atividades domésticas, sociais e industriais emerge como um dos problemas prioritários da sociedade atual (BRUNNER & BROWN, 1988; CETESB, 1990; TAKAYANAGUI, 1993, D'ALMEIDA & VILLENA, 2000).

Conforme a NBR 10.004/87, entende-se por resíduos sólidos:

“ aqueles resíduos sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de

serviços, de varrição e agrícola. Também incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviável face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987, p. 1,2).

Historicamente, existem três formas básicas adotadas pela sociedade urbana para disposição de resíduos sólidos: lixão ou vazadouro, aterro controlado e aterro sanitário (CHARNOCH & WELLS, 1985).

Os lixões ou vazadouros resultam da simples descarga do lixo à céu aberto sem levar em consideração: a área em que está sendo feita a descarga, a percolação dos líquidos derivados da decomposição do lixo, a liberação de gases para a atmosfera e a proliferação de insetos, roedores e outros animais que podem transmitir doenças ao homem (SERRA et al., 1998).

O aterro controlado diferencia-se do lixão apenas pelo fato dos resíduos não ficarem expostos a céu aberto, sendo recobertos com terra, não recebendo qualquer manejo quanto aos lixiviados da decomposição, drenagem dos mesmos e recolhimento ou tratamento dos gases liberados, conforme descrito por SEGURA MUÑOZ (2002).

Ainda conforme a mesma autora, o aterro sanitário é aquele espaço previamente projetado para posterior recebimento dos resíduos sólidos visando eliminar os passivos ambientais e à saúde pública.

Os aterros sanitários, embora importantes, apresentam segundo alguns autores, algumas limitações como o tempo de vida razoavelmente curto e a grande dificuldade na obtenção de locais adequados para sua implantação nas proximidades dos centros urbanos, que não aqueles considerados de recarga dos aquíferos (VIANA, 1999).

Além disto, têm sido descritos na literatura diversas outras questões que podem estar ligadas a instalações de aterros sanitários, no que diz respeito ao impacto social e biológico causado às populações circunvizinhas e

também aos trabalhadores do local (MORITZ, 1995; ELLIOTT et al., 1997; BAXTER et al., 1999).

### **3.1.3 O processo de pirólise**

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou até mesmo, em um ambiente com concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensa do material orgânico (VIERA; PEDROZA, M; SOUZA; PEDROZA, C, 2011, p.88).

De acordo com relato de VIERA et al (2011, p.88), a pirólise pode ocorrer por dois processos distintos: a pirólise lenta ou convencional (slow pyrolysis) direcionada para a produção de carvão e a pirólise rápida, onde controlando-se os parâmetros do processo podem ser obtidas quantidades apreciáveis de bio-óleo. Taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência das fases sólida e gasosa e produtos desejados determinam os dois tipos de pirólise. Estas variáveis também são responsáveis pela subdivisão dos tipos de pirólise em: carbonização, convencional, rápido, flash-líquido, flash-gás, vácuo, ultra, hidro-pirólise e metano-pirólise (VIEIRA, 2004), (Tabela 5).

Tabela 5 - Variantes do processo de pirólise

<b>Variantes do Processo</b>	<b>Tempo de Residência</b>	<b>Temperatura do processo, °C</b>	<b>Produtos obtidos</b>
<b>Carbonização Convencional</b>	Horas / dias 5 - 30 min	400 - 450 Até 600	Carvão vegetal Bio-óleo ,carvão e gás
<b>Rápida</b>	0,5 - 5 s	500 - 550	Bio-óleo
<b>Flash-líquido</b>	< 1 s	< 650	Bio-óleo
<b>Flash-gás</b>	< 1 s	> 650	Gás combustível
<b>Vácuo</b>	2- 30 s	400	Bio-óleo
<b>Metano-pirólise</b>	< 10 s	> 700	Produtos químicos
<b>Hidro-pirólise</b>	< 10 s	< 500	Bio-óleo e produtos químicos

Fonte: adaptado de GÓMEZ, (2002).

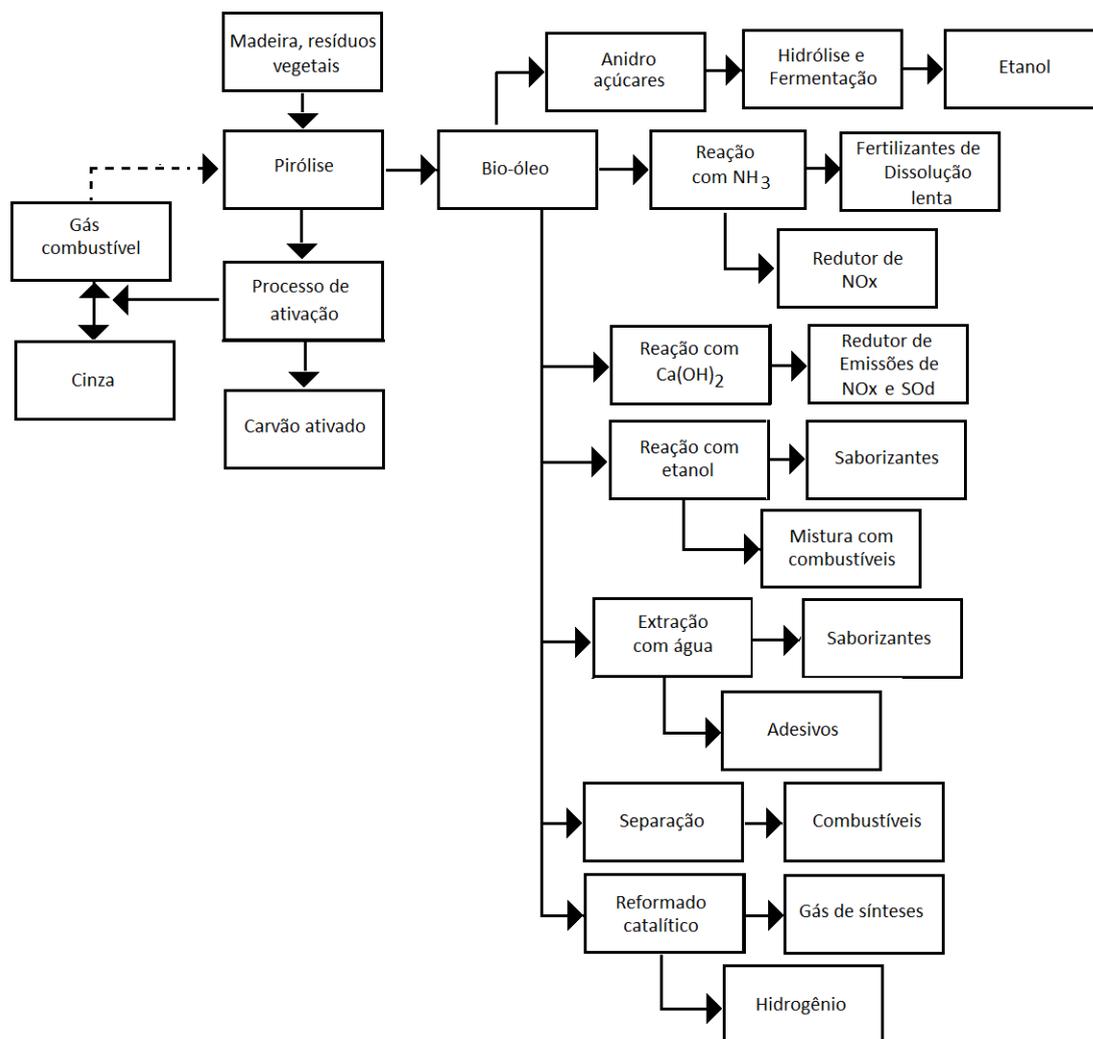
No processo pirolítico, conforme ROCHA, MESA PÉREZ e CORTEZ (2004, p.2), a conversão térmica promove a ruptura de ligações carbono-carbono dos componentes da biomassa, dando origem às frações oxidadas e hidrolisadas composta por fenóis, álcoois, cetonas, aldeídos, carboidratos e ácidos carboxílicos. Outra parte é reduzida à carbono.

Os autores supracitados relatam ainda que o tipo de pirólise irá determinar a proporção de substâncias com maior ou menor peso molecular, a saber:

- Pirólise lenta – moléculas grandes, responsáveis por provocar grande viscosidade do bio-óleo tornado difícil seu uso como combustível e como matéria-prima na formulação de resinas fenol-formaldeído embora tenha aplicação em outros fins;
- Pirólise rápida - óleos leves encontram muitas aplicações, sendo este processo de pirólise muito atrativo atualmente.

O bio-óleo pode ser separado em frações prontas para a obtenção de diversos produtos de interesse comercial (BRIDGWATER, 1999), (Figura 1).

Figura 1- Concepção de uma refinaria de bio-óleo.

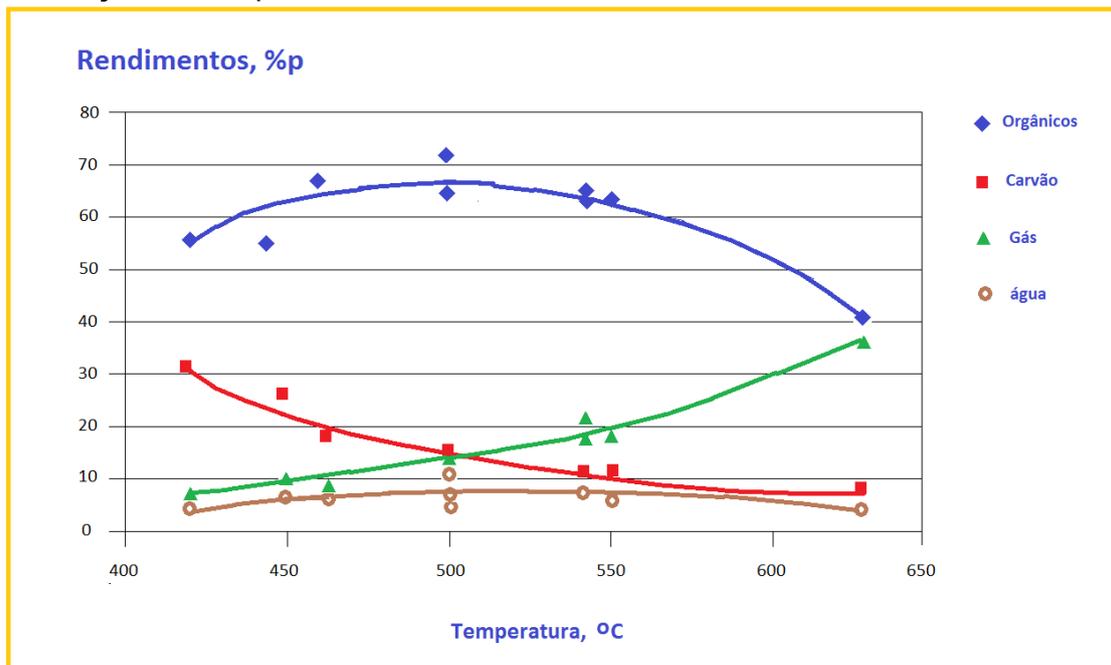


Fonte: ROCHA, MESA PÉREZ E CORTEZ. Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa, Campinas, 2004.

### 3.1.3.1 A Pirólise Rápida.

Quando os produtos de principal interesse são líquidos, de acordo com relato de ALMEIDA (2008, p. 13), sobretudo combustíveis, a rota da pirólise rápida é a escolha preferencial. Este processo requer altas temperaturas e taxas de transferência de calor, sendo para tanto necessário que a matéria a ser pirolisada esteja finamente dividida. Temperatura reacional, curto tempo de residência dos vapores e seu rápido resfriamento são características importantes deste processo. A Figura 2 mostra a influência do parâmetro temperatura nos rendimentos da pirólise da madeira.

Figura 2 - Rendimentos típicos em base seca para pirólise rápida da madeira em função da temperatura.



Fonte:(Adaptado de BRIDGWATER 2007).

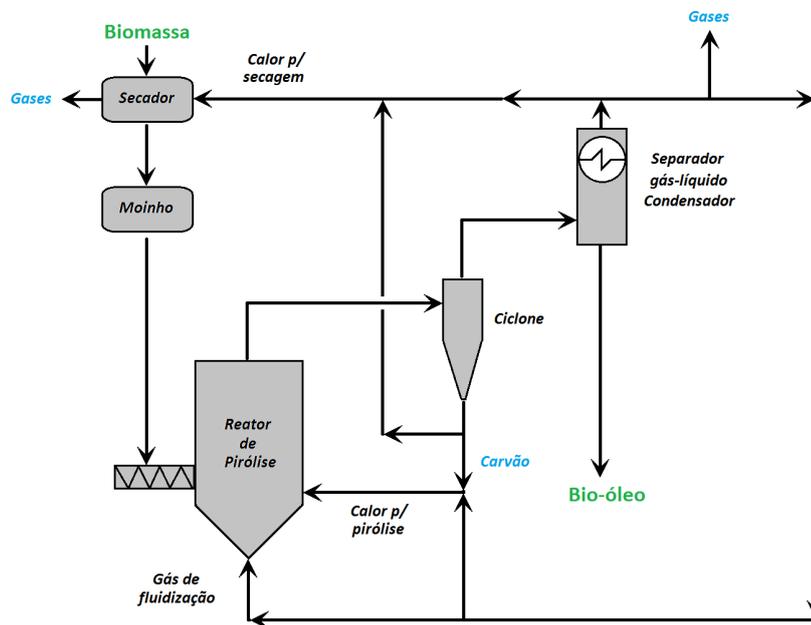
Os reatores de leito fluidizado e os de leito fluidizado circundante são os modelos mais empregados no mundo, tanto pela sua fácil operação como também pela possibilidade de adaptação ao aumento de escala, segundo BRIDGWATER e PEACOCKE (2000).

A tecnologia mais utilizada na pirólise rápida de materiais lignocelulósicos é representada pelo reator de leito fluidizado borbulhante, segundo ROCHA, MESA PÉREZ e CORTEZ (2004, p 14). Os referidos autores mencionam o emprego desta tecnologia em diversos centros de pesquisa, a saber:

- Canadá - A Universidade de Waterloo desenvolveu um processo baseado no conceito de leito borbulhante que têm sido aplicado com sucesso em vários laboratórios, com capacidades unitárias de 100 kg/h até 250 kg/h;
- Alemanha - O Instituto de Química da Madeira (IWC) em Hamburg, testou este sistema em unidades de 100 kg/h;
- Espanha - A companhia Unión Fenosa possui uma planta instalada em Meirama, como parte de um projeto de pesquisa da União Europeia, trabalhando com um reator de leito borbulhante com capacidade para 250 kg/h de biomassa. Nesta planta os gases da pirólise quando queimados são utilizados para a secagem da matéria-prima, e os gases do processo realimentam o reator borbulhante;
- Itália - Em Bastardos, uma unidade financiada parcialmente pela União Europeia com capacidade de 650kg/h emprega o processo térmico rápido ENSYN (RTP) com base na tecnologia de leito fluidizado circundante. A tecnologia RTP é empregada em pequena escala, 20 kg/h, no Technical Research Center (VTT), Espoo, Finlândia e também no Canadá e Estados Unidos.

No Brasil as pesquisas na área de pirólise rápida são desenvolvidas pelo grupo de biocombustíveis da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP em parceria com a BIOWARE, empregando tecnologia de leito fluidizado borbulhante com capacidade de 200kg/h (ROCHA et al.,2002; MESA-PEREZ et al.,2003). Na Figura 3 é ilustrada de forma básica os elementos que compõem uma planta de pirólise rápida.

Figura 3- Esquema conceitual do processo de pirólise rápida



Fonte:(BRIDGWATER et al.,1999).

### 3.1.3.2 - A Pirólise Empregando Lodo de Esgoto

Conforme relatam VIEIRA; PEDROZA. C; SOUZA e PEDROZA, M (2011, p. 88), Shen e Zhang (2004) empregaram uma mistura de 80% de lodo de esgoto e 20% de lixo urbano no processo de pirólise à 500°C obtendo 17% de óleo pirolítico com propriedades similares às do óleo diesel e poder calorífico de 33 MJ/Kg.

Ainda, conforme os quatro autores supracitados, em Belém, usando lodo aeróbio não calado de esgoto da estação de tratamento da SANEPAR, com percentuais de 49% de matéria orgânica e 51% de cinzas, foi realizada piólise em uma faixa de temperatura de 350-700°C com tempos entre 30 e 120 minutos. O percentual de óleos combustíveis obtidos foi de 17%, que continham ainda 4,5% de hidrocarbonetos alifáticos. Estes óleos apresentaram poder calorífico de 34,54 KJ/g e 60-80% de sólidos com características adsorventes.

Na Austrália a empresa ENERSLUDGE produz óleo pirolítico de lodo de esgoto em uma planta que processa 20 toneladas de lodo diariamente, produzindo 200-300 litros de óleo por tonelada de lodo seco (DOSHI; VUTHALURU; BASTOW, 2003).

No lodo de esgoto do tipo anaeróbio o conteúdo de cinzas apresenta grande influência na pirólise, segundo FONTS et al. (2009). De acordo com dados da pesquisa, o aumento do rendimento da fração gasosa foi favorecido pelo teor de cinzas presente na biomassa. Já o percentual da fração líquida foi menor nas condições reacionais, 550°C em leito fluidizado e nitrogênio como gás de arraste. Os teores de cinzas também proporcionaram aumento da concentração de gás H<sub>2</sub> na fração gasosa, fato devido às reações de desidrogenação favorecidas pelo efeito catalítico das cinzas presentes na biomassa. DOMÍNGUEZ, MENÉNDEZ e PIS (2006), trabalhando com dois tipos de lodos de esgoto, também constataram o aumento da concentração de H<sub>2</sub> com o aumento do teor de cinzas presente nas amostras.

LUTZ et al. (2000) trabalharam com três diferentes lodos: lodo doméstico de sistema de lodo ativado; lodo doméstico de digestor anaeróbico; lodo proveniente de indústria de verniz. Em sistema de batelada o reator pirolítico funcionou com tempo de retenção de 3 horas, 380°C e atmosfera de nitrogênio. O maior rendimento foi obtido com lodo de sistema ativado (31,4%) para o óleo, seguido do lodo industrial (14,2%) e do anaeróbico (11%) (Tabela 6). O teor de ácidos graxos presente no óleo foi maior no originado a partir do lodo ativado, 26%, sendo apenas 3% o seu teor no óleo proveniente do lodo digerido.

Tabela 6 - Rendimentos das frações orgânicas, carvão, água e gás resultantes de processos de pirólise de lodos de esgotos doméstico e industrial.

Tipo de lodo	Rendimento (%)			
	Óleo	Carvão	Água	Gás
Lodo ativado	31,4	50,1	6,8	11,7
Lodo digerido	11	69,4	10,2	9,4
Lodo industrial	14,2	68	10,1	7,7

Fonte: Adaptado de LUTZ et al., (2000).

KARAYILDIRIM; YANIK e YUKSEL (2006) estudaram a pirólise de lodo de esgoto em duas situações. Usando lodo misto, uma mistura de lodo químico e lodo aeróbio de uma indústria petroquímica (LM) e lodo flotado do decantador primário de uma refinaria (OL) (Tabela 7). A pirólise foi conduzida à pressão atmosférica com nitrogênio a 25 mL/min, taxa de aquecimento de 7°C/min até a temperatura de 500°C por uma hora.

Tabela 7 - Rendimento das fases de pirólise de lodo

Tipo de lodo	Composição (%)			
	Óleo	Gás	Água	Carvão
LM	13,2	20,9	26,0	39,9
OL	29,8	14,9	14,1	41,2

Fonte: Adaptado de Karayildirim; Yanik; Yuksel, (2006).

Para o lodo OL os principais produtos gasosos obtidos foram CO, hidrogênio e metano. Os produtos para o lodo LM foram CO, CO<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>. O lodo LM também apresentou maior concentração de grupos carboxílicos em sua composição, por apresentar uma composição maior de Cox, (Tabela 8).

Os gases oriundos da pirólise dos lodos LM e OL possuem poder calorífico de 29,9 e 35,8 MJNm<sup>-3</sup> respectivamente (KARAYILDIRIM; YANIK e YUKSEL, 2006). Este calor pode ser empregado no próprio processo de pirólise. Chang et al. (2000) afirmaram que a pirólise de esgoto com 19% de gases em concentração da fase gasosa possuía um poder calorífero de 2,55 MJNm<sup>-3</sup>.

Através de um estudo com pirólise convencional e pirólise por micro-ondas com quatro tipos de lodo MENEDEZ et al. (2004), obtiveram uma fase gasosa com alto teor de CO e H<sub>2</sub> (48-62%) para micro-ondas. Na pirólise convencional os gases possuíam alta concentração de hidrocarbonetos de elevado poder calorífero (25%). O poder calorífero dos gases variou entre 13,0 e 14,0 MJNm<sup>-3</sup> para a pirólise convencional, enquanto na pirólise por micro-ondas a faixa de variação ficou entre 6,0 e 8,6 MJNm<sup>-3</sup>.

WERLE e WILK (2010) relataram que o poder calorífero de uma mistura de hidrogênio, metano, monóxido de carbono e gás carbônico, fração gasosa de um processo de pirólise, é cerca de 15MJ/m<sup>3</sup>.

HOSSAIN; STREZOV e NELSON (2009) pirolisaram vários tipos de lodo, incluindo lodo industrial, lodo doméstico e lodo comercial, em reator de leito fixo com taxa de aquecimento de 10°C/min. Os gases CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> foram os principais produtos da fase gasosa, sendo esta monitorada por cromatografia gasosa. O principal produto em temperaturas mais baixas foi o CO<sub>2</sub>, enquanto o CO foi majoritário em temperaturas na faixa dos 500°C. Na faixa de temperatura entre 300 e 600°C os hidrocarbonetos foram determinados, sendo o hidrogênio liberado inicialmente a 300°C, mantendo uma taxa de liberação constante até o final do processo de pirólise.

Tabela 8 - Composição dos gases da pirólise de lodo de esgoto a 500 °C

Tipo de lodo	Composição (%)								
	H <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
LM	4,59	3,04	1,13	11,46	5,42	1,59	-	51,34	21,43
OL	23,96	19,47	6,32	6,43	4,22	1,99	1,24	27,32	9,05

Fonte: Adaptado de KARAYILDIRIM; YANIK; YUKSEL, (2006).

INGUANZO et al. (2002) descobriram através de pesquisas com pirólise de lodo de esgoto que o poder calorífero da fase gasosa era influenciado pela presença de hidrocarbonetos. De acordo com a pesquisa realizada, um poder calorífero de  $25,0 \text{ MJNm}^{-3}$  foi obtido, sob  $455^\circ\text{C}$  de temperatura reacional em reator pirolítico, a uma taxa de  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ . A liberação máxima de  $\text{C}_2\text{H}_4$  e  $\text{C}_2\text{H}_6$  é responsável pelo calor liberado. As mais altas concentrações de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}$  aconteceram em temperaturas mais elevadas, sob uma taxa de aquecimento de  $60^\circ\text{C}/\text{min}$ . Neste caso, o poder calorífero máximo foi de  $20,0 \text{ MJNm}^{-3}$ , sob uma temperatura de  $600^\circ\text{C}$ .

#### **3.1.4 - O Local de Coleta**

O lodo obtido é proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria (ETE Serraria), pertencente ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

O esgoto proveniente da rede coletora é bombeado por uma estação de seguida, o esgoto percorre todo o circuito de tratamento, composto por unidades de gradeamento mecanizado, sistemas de desarenação, reatores de digestão anaeróbia de esgoto, tanques de aeração e desnitrificação, tanques de sedimentação lamelares, tanques de armazenagem de lodo e casa de desidratação de logo por centrifugação (Figura 4).

#### **3.1.5 – Generalidades do sistema de tratamento ETE Serraria**

O canal de entrada da estação permite o escoamento por gravidade em todas as etapas previstas, sendo construído em cota superior ao nível do solo, impedindo eventuais riscos de inundações por enchentes do rio Guaíba e protegendo o nível do lençol freático da região da intervenção de estruturas.

### 3.1.5.1- Tratamento preliminar

Primeira etapa de tratamento, responsável pela remoção de sólidos grosseiros. O esgoto passa inicialmente por uma unidade de gradeamento grosseiro, com abertura entre barras de 49 mm, com limpeza mecanizada. A seguir o efluente passa por uma calha Parshall de 10 pés, onde a medição da vazão é feita por intermédio de um medidor por ultra-som. O canal prossegue ao encontro de 4 comportas de controle de alimentação que, por sua vez, dão acesso às respectivas peneiras mecanizadas com abertura de 3 mm entre as barras, sendo de funcionamento escalar, tipo “ step-screen”.

O material retido nas peneiras é automaticamente conduzido para caçambas de resíduos situadas em galeria abaixo do canal de entrada, por uma rosca transportadora e compactadora. O afluente passa pelo peneiramento, sendo direcionado por comportas até 4 desarenadores operando em paralelo, dotados de sistema de sucção de areia por “air lift”, montados sobre pontes rolantes em trilhos que percorrem toda a extensão dos canais. Estas pontes contam ainda com sistema de raspagem de gordura e o canal é dotado de sistema de injeção de ar, promovendo a formação de bolhas de ar que arrastam o material hidrofóbico à superfície.

A mistura água/areia retirada do fundo do canal pelo sistema “air-lift” é despejada em um canaleta lateral e conduzida por tubulações até 3 classificadores com rosca transportadora. Estes separam a areia em caçambas para a destinação final. A água que sai das classificadoras é conduzida por recalque novamente ao canal de entrada.

### 3.1.5.2 – Tratamento anaeróbio

Dentre os processos de tratamento que aplicam a granulação anaeróbia, os mais conhecidos são os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (WAGNER e COSTA, p.269, 2015) (O esgoto, após percorrer o tratamento preliminar, é encaminhado por meio de 8 vertedores, para reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB). Estas unidades alcançam remoção da ordem de 60% de DBO e 70% dos Sólidos Suspensos afluentes. Cada reator UASB possui estruturas internas que tornam possíveis processos em conjunto com a

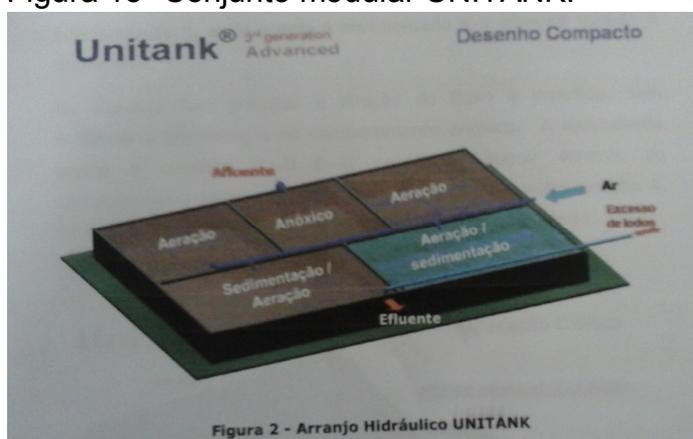
degradação anaeróbia, tais como sedimentação, floculação e separação trifásica.

O biogás gerado nos reatores é coletado por placas defletoras e direcionado por tubulação até a unidade de queima em “flare”.

### 3.1.5.3 – Tratamento aeróbio

Nesta fase, que é sequência do tratamento anaeróbio, o efluente é encaminhado ao conjunto de 8 reatores de Lodos ativados na modalidade Unitank, sendo cada um dividido em 5 compartimentos (A,B,C,D,E) interligados hidráulicamente (Figura 15).

Figura 15- Conjunto modular UNITANK.



Fonte: Adaptado do Manual de Operação ETE Serraria, DMAE, 2013.

O compartimento central C, ocorre o processo de desnitrificação, mantido em condições anóxicas, onde bactérias retiram oxigênio de espécies nitrogenados nitrato e nitrito liberando nitrogênio gasoso. Os compartimentos B e D operam em condições aeróbias oxidando a matéria orgânica e promovendo a nitrificação, de forma contínua e alternada, trocando material com o compartimento C.

Os compartimentos externos A e E são recobertos por lamelas que auxiliam na sedimentação do Lodo. Estes compartimentos atuam também como aeradores no processo de mistura do Lodo com agentes de sedimentação.

Os Lodos da sedimentação dos compartimentos lamelares seguem para o processo de centrifugação, sendo o efluente tratado vertido por meio de calhas com ar pressurizado para o rio Guaíba.

### 3.1.5.4 – Desidratação

O Lodo depois de misturado e homogeneizado nos tanques de armazenagem de Lodo é enviado para a casa de desidratação por bombeamento. Nesta unidade, 3 centrífugas do tipo “decanter” são interligadas por rede hidráulica à dosadores de floculante (polieletrólito catiônico), elevando o teor de sólidos para cerca de 25%. Ao final desta fase a torta de Lodo é depositada em caçamba e encaminhada ao aterro sanitário licenciado.

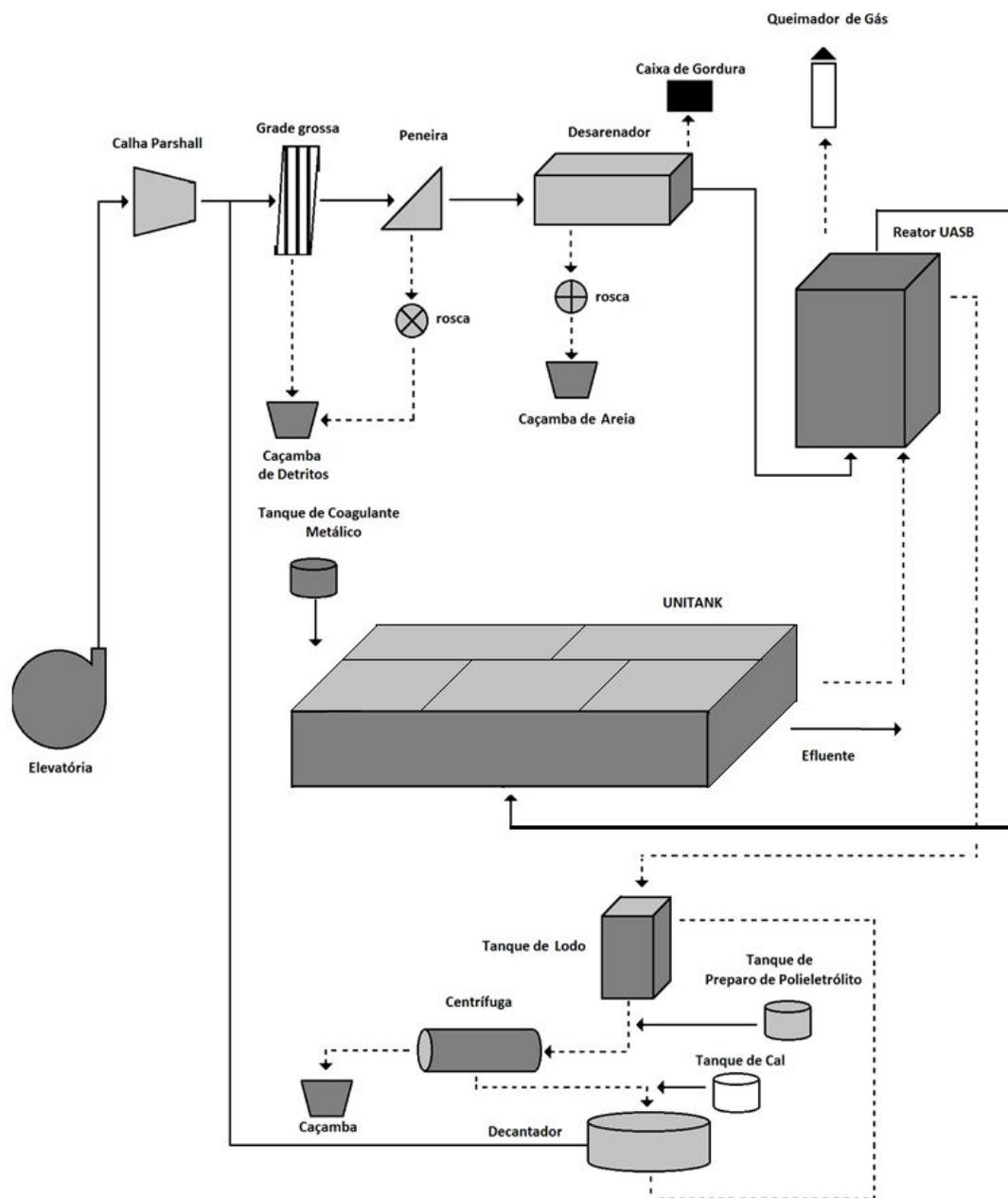
Os parâmetros do afluente e parâmetros de lançamento do efluente estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9- Condições do afluente e do efluente.

	Parâmetros	Valor
<b>Condições do Afluente</b>	Q média - l/s	2.710,00
	Q máxima - l/s	4.115,00
	DQO - mg/l	498,15
	DBO5 - mg/l	276,75
	SST - mg/l	266,50
	TKN - mg/l	45,00
	PT - mg/l	7,00
	pH	7,0 - 7,5
	Coliforme fecal NMP / 100 ml	1,00E + 0,7
<b>Condições do Efluente</b>	Nitrogênio Amoniacal	< 10 mg/l NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	Fósforo Total	< 1 mg/l
	DBO5 - Demanda Bioquímica de Oxigênio	< 20 mg / l
	Sólidos Suspensos Totais	< 20 mg / l
	Coliformes Termo tolerantes	< 104 NMP / 100 ml

Fonte: Adaptado do Manual de Operação ETE Serraria, DMAE, 2013.

Figura 4- Diagrama do tratamento ETE Serraria.



Fonte: Adaptado do Manual de Operação ETE Serraria, DMAE, 2013.

### 3.1.5.5 – Balanço de Massa ETE Serraria

Na tabela abaixo é apresentado o balanço de massa da estação, com as respectivas vazões afluentes e efluentes de cada unidade operacional e massa de sólidos esperada no fluxo.

TABELA 10 – Balanço de Massa ETE Serraria

<b>Balanço de Massa</b>				
<b>Fase Líquida</b>	<b>Afluente</b>	<b>Efluente UASB</b>	<b>Efluente Unitank</b>	<b>Centrado Centrifuga</b>
Vazão (m <sup>3</sup> /d)	234.144	199.022	234.144	699
Concentração (mg SS/l)	266	80	20	2.018
Massa (Kg SS/d)	62.400	15.912	4.682	1.412
<b>Fase Sólida</b>	<b>Lodo UASB</b>	<b>Lodo Descarte Aerador</b>	<b>Lodo Decantador Centrado</b>	
Vazão (m <sup>3</sup> /d)	717	2.392	23	
Concentração (mg SS/l)	35.000	8.000	70.000	
Massa (Kg SS/d)	25.110	19.135	1.581	
<b>Clarificados e Lodo Desidratado</b>	<b>Clarificado Decantador Centrado</b>		<b>Lodo Centrifuga</b>	
Vazão (m <sup>3</sup> /d)	677		107	
Concentração (mg SS/l)	259		250.000	
Massa (Kg SS/d)	176		26.837	

Fonte: Adaptado do Manual de Operação ETE Serraria, DMAE, 2013.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.2.1 A Coleta do Lodo

O lodo proveniente da etapa final de disposição dos resíduos sólidos, a unidade de centrifugação, foi recolhido e acondicionado em recipiente de 10 L.

Foram coletados aproximadamente 6 quilos de lodo desidratado, com um percentual de umidade variando entre 70 – 80% de umidade. Esta variação percentual se deve geralmente às condições operacionais do processo de centrifugação no qual, a dosagem de polieletrólito necessária para facilitar a separação do lodo digerida a fase aquosa pode oscilar conforme variáveis de operação do sistema.

### 3.2.2 O Preparo da Amostra

Em seguida o lodo desidratado foi pesado em balança digital, sendo registrada a massa de 5.936 g. Em etapas o lodo foi seco em forno elétrico, no Laboratório de Combustíveis da UFRGS. Inicialmente em temperatura de 100°C, em seguida 200°C e finalmente a temperatura máxima de 300°C, por 12 horas a cada carga. A temperatura de 300°C se mostrou ideal para o condicionamento térmico do Lodo, uma vez que as temperaturas empregadas inicialmente promoviam a formação de uma camada superficial ressequida no Lodo. Tal fato impedia que a umidade do conteúdo interno da carga fosse evaporada de maneira eficiente. A temperatura de 300°C promoveu o aumento da fase gasosa, elevando a pressão interna da massa de Lodo e com isso, produziu fraturas na camada externa, permitindo que a umidade fosse livrada por caminhos preferenciais. No final do processo de remoção da umidade obteve-se um total de 1680 g, desta forma o percentual de umidade no Lodo original foi de 72%.

O material em seguida foi triturado manualmente com o auxílio de um gral de pistilo e peneirado em peneira de 35 mesh.

### 3.2.3 A Pirólise do Lodo

Para o processo de pirólise convencional empregou-se uma carga de 400 g, em reator pirolítico de aço inoxidável dotado de aquecimento elétrico e monitoramento eletrônico de temperatura. O sistema foi antes purgado com uma mistura de gás argônio contendo 5% de hidrogênio (100 mL /min) por 15 minutos. Após o tempo de purga, iniciou-se a pirólise operando em condições de pressão atmosférica, em temperatura máxima operação de 800°C e taxa de aquecimento de 20°C/min.

Os produtos voláteis prosseguiram ao processo de craqueamento térmico em um segundo reator de aço inoxidável, com 20mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, também sob temperatura de operação de 800°C, sob as mesmas condições.

Os produtos de saída do reator foram resfriados por um sistema com condensador de aço a temperatura de 100°C, seguindo para um coletor de líquidos e as frações gasosas resfriados em um segundo condensador (Figura 16).

Figura 16- Foto do Aparato de Pirólise



O material carbonáceo que não sofre liquefação e evaporação nas condições da pirólise, o produto do condicionamento térmico com vistas ao processo de incineração, foi submetido em mufla em dois regimes de temperatura. Uma fração em 750°C, simulando condições medianas para a maioria dos processos de incineração que fazem uso de equipamentos de investimento não muito oneroso. E uma segunda fração sob condições de 1.100°C, no interesse de verificar-se possíveis condições de vitrificação, condição apropriada para posterior emprego das cinzas como insumo cerâmico. O tempo de incineração para ambas as amostras foi de 12 horas.

Amostras do resíduo remanescente do reator de pirólise, carvão obtido do processo, foi calcinado em mufla a 1.100°C para determinação do teor de cinzas. Para tanto foi pesada 18,528 g de carvão remanescente. Também foi determinado o teor de cinzas da amostra de lodo peneirado em malha 35 mesh, sendo de 16,471 g sua massa pesada, sob uma temperatura de 750°C em mufla. O tempo de calcinação para ambas as amostras foi de 12 horas.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

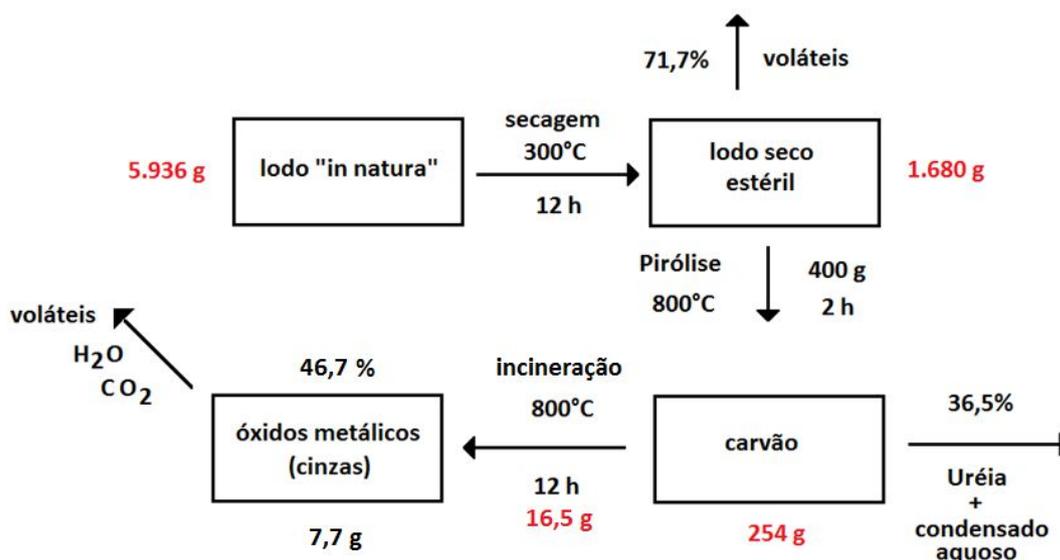
Após o término do processo de pirólise, da massa inicial de 400 g foram obtidos 254 g de resíduo que permaneceu no reator. A fração líquida obtida no condensador foi de aproximadamente 140 g. A fração líquida foi destilada. A temperatura de saída da fase gasosa foi registrada em 65°C, sendo coletados cerca de 70 g no condensador, permanecendo os outros 70 g no balão como fase aquosa remanescente. Estes materiais coletados pelo aspecto e demais características sensoriais, tais como viscosidade ao tato e odores característicos, não apresentaram propriedades combustíveis, sendo rejeitos aquosos. Os resultados da pirólise e das incinerações são mostrados na Tabela 11. O material remanescente da calcinação a 1.100°C foi pesado perfazendo 6,226 g. A massa de cinzas remanescente da amostra de lodo calcinado a 750°C foi de 7,695 g.

Tabela 11 – Resultados dos processos térmicos de Pirólise, Incineração e Inertização.

Processo	Massa inicial (g)	Resíduo (g)	Resíduo (%)
Pirólise	400	254	63,5
Cinzas 1.100°C	18,528	6,226	33,6
Cinzas 750°C	16,471	7,695	46,7
Umidade	5,936	1,680	28,3

O procedimento de inertização térmica à 300°C proporcionou uma redução mássica superior à 60%. O processo de pirólise conduzido sob temperatura de 800°C promoveu a da massa inicial do Lodo seco em 36,5%. O processo de incineração à 750°C, por sua vez, reduziu a massa em 53,35%. Todo os procedimentos associados contribuem para que, uma carga de Lodo desidratada de aproximadamente 1.000 kg, primeiramente seja levada a algo em torno de 280 kg, e em seguida reduzida à aproximadamente 130 kg. A Figura 7 ilustra as etapas do processo.

Figura 7- Fluxograma do processamento térmico de Inertização, Pirólise e Incineração.



Em contraponto às despesas com energia elétrica nos procedimentos prévios de secagem, na condução da pirólise e no processo de incineração, temos a amortização dos custos com a operação logística devido à drástica redução da massa a ser transportada. Conforme SPINOSA et al. (2011), o gerenciamento do lodo em ETES tem sido um problema de difícil, tendo em vista que esse subproduto do tratamento representa uma pequena parcela do volume do esgoto tratado, enquanto o seu manejo demanda 50% dos custos operacionais.

As análises dos metais Fe, Mg, Al, Na, K, Ca e Si foram realizadas na empresa Laboratórios Green Lab, Análises Químicas e Toxicológicas, em Porto Alegre (Tabela 12).

Tabela 12 - Teor de Cinzas para Oxidação à 750°C.

Parâmetro	Unidade	Resultado	LQ*	Referência do método analítico
<b>Alumínio</b>	mg Al/Kg	65850	0,590	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Ferro</b>	mg Fe/Kg	55834	0,590	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Cálcio</b>	mg Ca/Kg	25217	1,95	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Magnésio</b>	mg Mg/Kg	8676	1,28	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Potássio</b>	mg K/Kg	5543	1,57	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Sódio</b>	mg Na/Kg	1590	12,0	Preparo: EPA 3050B/1996 Determinação: EPA 200.7/2001
<b>Silício</b>	mg Si/Kg	107	1,61	EPA Método 200.7/2001, revisão 5.0 - Janeiro/2001 e EPA 3050B, revisão 2-Dezembro/1996
<b>Umidade</b>	%	<0,0001	0,0001	Gravimétrico

Fonte: adaptado de **RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº. 19954/2016-1.0, GREEN LAB** – Análises Químicas e Toxicológicas. (\*) LQ: Limite de Quantificação, na mesma unidade do parâmetro analisado.

Considerando o somatório da massa total em miligramas da corrida analítica conforme tabela acima, 162.817 mg, o Al responde pelo percentual majoritário da composição das cinzas (40,44%), seguido pelo Fe (34,29%), Ca (15,49%), Mg (5,33%), K (3,40%), Na (0,97%) e Si (0,06%) com o menor percentual. Extrapolando estes resultados para estimativas de suas relações mássicas destes elementos com os compostos mais prováveis, comumente encontrados nas caracterizações químicas das cinzas de Lodos, levando em conta à massa amostral de 7, 695 gramas temos: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.913,5 mg (25%); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.25,2 mg

(16%); CaO, 272 mg (3,53%); MgO, 110,7 mg (1,44%); K<sub>2</sub>O, 102,8 mg (1,33%); Na<sub>2</sub>O, 32,96 mg (0,4%) e Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,758 mg (0,02%).

Para um somatório da massa total estimada dos compostos de 3.658,91 mg (47,54%), temos para o restante material carbonáceo oxidável e demais materiais volatilizados, o que considerando apenas os elementos representados na Tabela 4, aproxima os dados mencionados com os da literatura pesquisada.

## **5 CONCLUSÃO**

O processo de pirólise do lodo de esgoto mostrou-se eficiente na redução da massa inicial deste principal rejeito oriundo do tratamento do efluente doméstico.

As altas temperaturas garantem a esterilização inviabilizando possíveis agentes de contaminação biológica.

O processo de inertização promoveu drástica redução percentual do volume inicial do rejeito em 61,7% da massa de lodo úmido. A pirólise deu sequência à redução da massa, elevando para 82,1%. A incineração completou o processo de redução mássica, tendo restado apenas 8,3% da massa original, o que vem favorecer a economia em questão de logística de armazenamento e transporte, além de promover a inertização dos componentes metálicos sob a forma de óxidos, possibilitando seu emprego como insumo em formulações cerâmicas e de alvenaria.

Em plantas de tratamento de efluentes domésticos, onde os processos de lodos aeróbios são empregados em complementaridade aos processos anaeróbios, o processo pirolítico do lodo pode gerar óleos combustíveis, gases com potencial de queima e carvão, reduzindo o passivo energético da unidade de tratamento (caso da ETE Serraria).

As vantagens supracitadas contribuem para aumentar consideravelmente a capacidade de estocagem dos aterros, acolhendo futuras demandas na universalização do saneamento básico.

O alto teor de cinzas do Lodo, 53,6%, de acordo com a pesquisa, explica a maior formação de coque, o carvão. A fração líquida obtida na pirólise não apresentou potencial de combustão por ignição mecânica, que, de acordo com os dados bibliográficos, confirma a propriedade do Lodo aeróbio em gerar poucos hidrocarbonetos leves por craqueamento pirolítico.

## REFERÊNCIAS

1. ABREU, S. B.; ZAIAT, M. **Desempenho de Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo no Tratamento de Esgoto Sanitário**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.13 - Nº 2, 181-188, 2008.
2. ALMEIDA, M. B. B. **Bio-óleo a Partir da Pirólise Rápida, Térmica ou Catalítica, da Palha da Cana-de-açúcar e seu Co-processamento com Gasóleo em Craqueamento Catalítico**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, 2008.
3. DAVID, A. C. **Secagem Térmica de Lodo de Esgoto. Determinação da Umidade de Equilíbrio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). 150p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
4. FERREIRA, F.D.; CARAIOLA, M. **Eficiência do Lodo Ativado em Fluxo Contínuo Para Tratamento de Esgoto**. Revista de Academia de Ciências Agrárias e Ambientais. V.6, n.2, p. 259-279, 2008.
5. GEYER, A. L. B. **Contribuição ao Estudo da Disposição Final e Aproveitamento da Cinza do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário como Adição ao Concreto**. 2001. 238 f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
6. GUEDES, C.L.B.; ADÃO, D.C.; QUESSADA T.P.;BORSATO, D.; GALÃO, O.F. **Avaliação de Biocombustível Derivado do Bio-óleo Obtido por Pirólise Rápida de Biomassa Lignocelulósica como Aditivo para Gasolina**. Quimica Nova, Vol. 33, No. 4, 781-786, 2010.

7. KATAYAMA, V. T. **Quantificação da Produção de Lodo de Estação de Tratamento de Água de Ciclo Completo: Uma Análise Crítica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental).139p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
8. KRELING, M. T. **Aterro Sanitário da Extrema e Resíduos Sólidos Domiciliares: percepção dos moradores- Porto Alegre-RS.**2006. 203f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
9. LUPATINI, G. **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão em Escolha de Áreas para Aterros Sanitários.** 2002.166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
10. MKMBr Engenharia Ambiental. **Manual de Operação Hidráulica e de Processo. ETE Serraria-** Porto Alegre- DMAE, Julho/2013(versão2).
11. OLIVEIRA, A. S. **Tratamento de Esgoto Pelo Sistema de Lodo Ativado no Município de Ribeirão Preto, SP: Avaliação da Remoção de Metais Pesados.** Dissertação (Mestrado - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo). 172 f. Ribeirão Preto. 2006.
12. OLIVEIRA, G.S.S.; ARAÚJO, C.V.M.; FERNANDES, J.G.S. **Microbiologia de Sistema de Lodos Ativados e sua Relação com o Tratamento de Efluentes Industriais: a experiência da Cetrel.** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.14 n.2,183-192, 2009.
13. ROCHA J.D.; MESA PÉREZ, J.M; CORTEZ, L.A.B . **Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa. In: Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Alcool” UNIFEI, Itajubá,** 12-16 de julho de 2004.
14. ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. **Contribuição Para o Aproveitamento Energético do Lodo de ETEs em Processos Térmicos.** Revista DAE. p. 55-62, janeiro/abril 2015.
15. TROLEIS, A. L.; BASSO, L. A. **A Evolução da Disposição dos Resíduos Sólidos em Porto Alegre e a Coleta Seletiva.** Sociedade e Território, Natal, v. 25, nº 1, 1 - 18, 2013.
16. VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F.; PEDROZA, C. M. **O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento**

**do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

17. WAGNER, J.; COSTA, R. H. R. **Reator em bateladas sequenciais de grânulos aeróbios: estudo da formação dos grânulos e do efeito da duração do ciclo na remoção de carbono, nitrogênio e fósforo de esgoto doméstico.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, v.20 n.2, 269-278, 2015.