

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE  
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE LODOS DE  
EFLUENTES DOMÉSTICO E INDUSTRIAL COMO COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO  
DE ENERGIA

FABRICIO BORGES

Joinville

2008

FABRICIO BORGES

CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA POTENCIALIDADE DE LODOS DE  
EFLUENTES DOMÉSTICO E INDUSTRIAL COMO COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO  
DE ENERGIA

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de  
Processos, na Universidade da Região de Joinville.  
Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Noeli Sellin.  
Co-orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Sandra Helena Westrupp  
Medeiros.

JOINVILLE

2008

## Termo de Aprovação

### “Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia”

por

Fabricio Borges

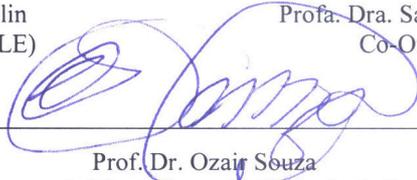
Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Profa. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros  
Co-Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Ozair Souza  
Coordenador do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

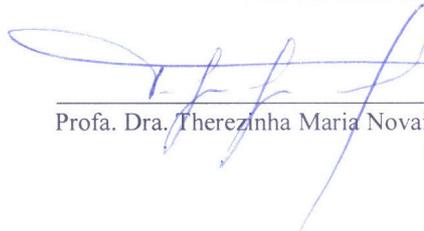
#### Banca Examinadora:



Profa. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia  
(UDESC)



Profa. Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira  
(UNIVILLE)

Joinville, 29 de agosto de 2008.

Ao meu Pai , que em todos os momentos  
sempre me apoiou, ajudou, investiu  
e me incentivou.

## AGRADECIMENTOS

- À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Noeli Sellin, que como orientadora e amiga soube cobrar e não mediu esforços em oferecer todas as condições necessárias à realização deste trabalho.
- À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Sandra Helena Westrupp Medeiros pela colaboração e auxílio neste trabalho.
- À Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE e ao Programa de Pós-graduação de mestrado em Engenharia de Processos.
- Às empresas DÖHLER S.A., SAMAE-SBS E RIGESA LTDA pelo fornecimento das amostras de lodo utilizadas neste trabalho.
- A todos os professores e colegas mestrandos do Curso de Mestrado em Engenharia de Processos, que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.
- A Deus por mais esta conquista, por me ajudar em meu crescimento profissional, por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho durante esta trajetória. Agradeço aTi, por tudo.
- A minha Família Marla e Juliana. Jamais irei me cansar de agradecer tudo o que vocês fizeram por mim durante todos esses anos. Principalmente, a minha mãezinha querida muito obrigada por sempre me incentivar, orientar e apoiar, mesmo que a distância. A todos vocês, o meu AMOR!
- Aos meus amigos da Virgínia, Ferrari, Maria Elisa, Ana Paula, e Valdinei. A convivência com vocês durante todo este tempo me fez perceber como são especiais. Serei eternamente grato pelo carinho, apoio e amizade. Vocês são pessoas maravilhosas que Deus colocou em meu caminho durante esta trajetória e que continuarão a fazer parte da minha vida.
- Aos demais familiares e amigos, pelo apoio técnico e moral recebido durante o desenvolvimento desse trabalho.
- E principalmente, ao meu pai NENO, por todo o apoio e amor que foram a mim dedicados através de ensinamentos, conselhos e lições de vida. Agradeço a você por ter existido na minha vida.

## RESUMO

A geração de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes domésticos e industriais vem se intensificando principalmente nos grandes centros urbanos, o que tem gerado sérios problemas relacionados ao seu descarte, pois existem poucos locais adequados para recebê-los e estão em estado de saturação. Tendo em vista a redução destes resíduos e a busca de fontes alternativas na geração de energia, neste trabalho, amostras de lodos provenientes de estação de tratamento de efluentes (ETE) doméstico e de processos industriais têxteis e celulose e papel foram caracterizados e seu potencial como biomassa combustível foi avaliada. Os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram determinados por análise elementar; os teores de sólidos totais, voláteis, cinzas e umidade por análise aproximada; o comportamento térmico frente à combustão e pirólise por análise termogravimétrica (ATG) e análise térmica diferencial (ATD); o potencial energético a partir do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) e as emissões atmosféricas durante a queima por análise Orsat e análise eletrônica direta. As amostras de lodo doméstico e têxtil demonstraram semelhanças na composição elementar para teores de C, N, H e S, enquanto que a de lodo da indústria de celulose e papel apresentou carga orgânica (C%) duas vezes maior que as demais. Os teores de enxofre e nitrogênio encontrados foram relativamente baixos em todas as amostras. O poder calorífico apresentou valor médio de 19 MJ/kg, independente da composição das amostras de lodo estudadas. Por ATD, observa-se que entre 200 e 600 °C, as três amostras apresentaram comportamento semelhante frente à combustão e pirólise, com significativa liberação de energia. Nas condições de combustão, os resultados de ATG mostram que a amostra de celulose e papel apresentou maior estabilidade térmica do que as demais e todas as amostras apresentaram menor porcentagem de cinzas ao final desse processo do que em pirólise. Da análise dos gases gerados após a queima das amostras, observa-se um consumo de oxigênio da ordem de 17 a 30% para todas. Houve geração de níveis significativos de monóxido e dióxido de carbono e baixos níveis de dióxido de enxofre e de monóxido e dióxido de nitrogênio. Estes resultados indicam a possibilidade do uso dos três tipos de lodos como biomassa combustível, principalmente em função da potencialidade energética verificada.

Palavras-chave: Lodo; Biomassa; Caracterização, Geração de energia.

## ABSTRACT

The generation of sludge from treatment plants of industrial wastewater and sewage has been intensifying especially in large urban centers, which has created serious problems related to its disposal, because there are few suitable sites to receive them and are in a state of saturation. In order to reduce these wastes and the search for alternative sources to generate energy, in this work, samples of sludge from different treatment plants of sewage and of industrial wastewater from pulp and paper industry and textile industry were characterized and its potential as biomass fuel was evaluated. The carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur percentage were determined by elemental analysis; the total solids, volatile, ash and moisture contents by approximate analysis; the thermal behavior under conditions of pyrolysis and combustion by thermogravimetric analysis (TGA) and differential thermal analysis (DTA); the energy potential by higher calorific value (PCS) and lower calorific value (PCI); and atmospheric emissions during the burning by Orsat and direct electronic analysis. The samples of sludge from sewage and from wastewater textile industry showed similarities in the elemental composition for C, N, S and H, while the pulp and paper industry sludge showed organic load (C%) two times bigger than the others. The sulfur and nitrogen percentage were relatively low in all samples. The sample calorific value was around 19 MJ/kg, regardless of the composition of the sludge samples studied. For DTA, it is observed that between 200 and 600 °C the three samples showed similar behavior under the conditions of combustion and pyrolysis, with a significant release of energy. Under the conditions of combustion, the results of ATG showed that the sludge sample of pulp and paper industry had higher thermal stability than the others and all samples showed a lower percentage of ash at the end of this process than in pyrolysis. From the analysis of gases generated after burning of the samples, it is observed that there is an oxygen consumption of about 17 to 30% for all. There was a significant generation of carbon monoxide and carbon dioxide and low levels of sulfur dioxide and nitrogen monoxide and nitrogen dioxide. These results indicate the possibility of the use of three types of sludge as biomass fuel, especially in function of the release of energy verified.

Keywords: Sludge; Biomass; Characterization; Energy generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da origem dos resíduos.....	15
Figura 2: Fluxograma da ETE de esgoto doméstico.....	42
Figura 3: Fluxograma da ETE de indústria têxtil.....	43
Figura 4: Fluxograma da ETE da indústria de celulose e papel.....	44
Figura 5: Aparelho Orsat utilizado na análise dos gases.....	48
Figura 6: Equipamento TESTO - coleta e análise dos gases.....	48
Figura 7: Resultados da análise elementar dos lodos.....	50
Figura 8: Comparação dos resultados da análise elementar dos lodos estudados com valores encontrados na literatura.....	51
Figura 9: Resultados da determinação de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis.....	53
Figura 10: ATG das amostras de lodo doméstico, têxtil e de celulose e papel em atmosfera oxidante (combustão) .....	56
Figura 11: ATD das amostras de lodo doméstico, têxtil e de Celulose e papel em atmosfera inerte (pirólise).....	57
Figura 12: ATG das amostras de lodo doméstico, têxtil e de celulose e papel em atmosfera oxidante (combustão).....	59
Figura 13: ATD das amostras de lodo doméstico, têxtil e de celulose e papel em atmosfera inerte (pirólise).....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial energético de biomassas.....	20
Tabela 2: Oferta Interna de Energia - %.....	21
Tabela 3: Poder Calorífico de alguns gases.....	25
Tabela 4: Rendimentos dos produtos típicos obtidos por diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).....	27
Tabela 5: Composição média do lodo de ETE no Brasil.....	30
Tabela 6: Geração de lodo por categoria de produção.....	33
Tabela 7: Composição físico-química de lodo de celulose e papel.....	34
Tabela 8: Comparação entre os diversos tipos de resíduos, em relação ao poder calorífico, conteúdo de cinzas e conteúdo de água.....	34
Tabela 9: Caracterização de lodo têxtil.....	36
Tabela 10: Padrões Nacionais de Qualidade do Ar.....	38
Tabela 11: Poder calorífico das biomassas estudadas.....	55
Tabela 12: Emissões gasosas da queima dos lodos doméstico e industrial.....	62

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Problemática dos resíduos sólidos.....	16
<b>2.2 BIOMASSA: FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Alternativas de aplicação da biomassa.....	23
2.2.1.1 Combustão.....	24
2.2.1.2 Pirólise.....	26
<b>2.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE ALGUMAS BIOMASSAS.....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Lodo originário do esgoto doméstico.....	28
2.3.2 Lodo originário da indústria de papel e celulose.....	31
2.3.3 Lodo originário da indústria têxtil.....	35
<b>2.4 ASPECTOS AMBIENTAIS.....</b>	<b>37</b>

<b>3 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>41</b>
3.1 ORIGEM DAS BIOMASSAS (LODOS).....	41
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS (LODOS) UTILIZADAS.....	44
3.2.1 Teor de Sólidos Totais.....	45
3.2.2 Teor de Sólidos fixos e sólidos voláteis.....	45
3.2.3 Análise elementar.....	46
3.2.4 Estudo do comportamento térmico.....	47
3.2.5 Determinação do poder calorífico.....	47
3.3 ANÁLISE DOS GASES GERADOS NA QUEIMA DAS BIOMASSAS.....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS (LODOS) .....	50
4.1.1 Análise elementar.....	50
4.1.2 Determinação dos teores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis .....	53
4.1.3 Determinação do poder calorífico.....	54
4.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	56
4.2.1 Análise termogravimétrica (ATG).....	56
4.2.2 Análise térmica diferencial (ATD).....	58
4.2.3 Comparação entre as curvas de ATG e ATD.....	60
4.3 ANÁLISE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	61
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>

## INTRODUÇÃO

A elevada produção de lodo tanto, no tratamento de esgoto doméstico como também no de origem industrial, principalmente nos grandes centros urbanos, aliada à necessidade de destinação final adequada, tem originado sérios problemas ambientais no país. Para os resíduos de saneamento, a Agenda 21 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 (FONTES, 2003).

A busca pela melhoria da qualidade ambiental está intimamente relacionada à redução de resíduos gerados pela atividade industrial. As empresas, de um modo geral, já estão se conscientizando do problema ambiental e se reestruturando a fim de reduzir ou eliminar os resíduos através da reciclagem ou de seu reaproveitamento (CRUZ (2000).

O trato inadequado dos resíduos sólidos industriais contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos, constituindo tarefa potencialmente poluidora do ar, solo e, principalmente, águas superficiais e do subsolo. A disposição de resíduos industriais em aterros sanitários, a céu aberto ou em lagos, rios e mares faz com que ocorram

não apenas prejuízos ao equilíbrio da natureza como também perdas econômicas pelo não aproveitamento de materiais perfeitamente passíveis de novas utilizações, visto que o custo com a disposição é alto (CRUZ, 2000).

Desta forma Campreguer (2005) afirma que a elaboração de um modelo de desenvolvimento auto-sustentável, na questão ambiental, desponta como objetivo principal dentro de uma sociedade consciente. O aumento populacional e a disputa entre espaços produtivos são reais situações que fazem com que o meio ambiente não seja considerado só meio ecológico, mas também uma variável econômica, destacando-se dentre os fatores de competitividade e oportunidade de negócios. Essa nova realidade está ocorrendo devido às novas técnicas que apontam outros destinos para os resíduos gerados. O aproveitamento de materiais, até então considerados rejeitos, está dando um novo enfoque aos mesmos, transformando-os de problema a uma solução lucrativa.

Desta forma, o meio técnico-científico vem se dedicando cada vez mais na busca de tecnologias alternativas para o descarte dos resíduos no ar, água e solo, pois o meio ambiente tem demonstrado cada vez mais sua incapacidade em absorver as quantidades crescentes de seus resíduos.

Uma das possibilidades para o reaproveitamento de resíduos, tais como, lodo de efluentes doméstico e industrial é o uso na agricultura (CHAGAS, 2000; ARAUJO *et al*, 2005), como material suplementar para a produção de concreto (FONTES, 2003; CRUZ, 2000) e como biomassa combustível na geração de energia (DE SENA, 2005; WERTHER e OGADA, 1996). No entanto, a aplicação de lodo, neste último caso, ainda ocorre em escala laboratorial e plantas-piloto, porém devido principalmente à sua potencialidade energética e vantagens ambientais no seu uso como biomassa, estudos merecem ser ampliados visando uma aplicação industrial.

Neste contexto, este trabalho buscou caracterizar e avaliar a potencialidade do uso de biomassas (lodos) oriundas de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) doméstico e de indústrias têxtil e de papel e celulose como fontes alternativas de combustível na geração de energia.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar lodos de efluentes doméstico e industrial visando o estudo de sua potencialidade como biomassa combustível na geração de energia.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física e química dos lodos doméstico e industrial;
- Estudar o comportamento térmico frente à combustão e pirólise dos lodos;
- Analisar os gases gerados na queima dos lodos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A partir do conceito apresentado por Formosinho *et al* (2000), identifica-se os resíduos tendo origem nos restos de um processo de produção ou como substâncias, produtos ou objetos que ficaram incapazes de utilização para os fins que foram produzidos (Figura 1). Em ambos os casos, pressupõem-se que o detentor tenha que se desfazer deles.



Figura 1. Fluxograma da origem dos resíduos.

Fonte: Formosinho *et al* (2000)

A NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) define resíduos sólidos relacionando com as atividades de origem, como segue:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle a poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível.

A mesma norma classifica os resíduos em:

(i) classe I, perigosos – aqueles que apresentam periculosidade com risco à saúde pública ou riscos ao meio ambiente, que apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, nas condições em que estão estabelecidas na norma ou que estão relacionadas em tabelas contendo a relação de resíduos perigosos de fontes não específicas e a relação de resíduos perigosos de fontes específicas;

(ii) classe II não perigosos, estes podendo ser:

- Classe II A (não-inertes) – aqueles que não se enquadram nas classificações classe I ou classe II B. Podem ter propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Classe II B, (inertes) – não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de sustentabilidade da água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez dureza e sabor.

Diferentes classes de resíduos não devem ser misturadas a não ser com o fim de melhorar a segurança ou de valorização (FORMOSINHO *et al*, 2000). Desta forma, as aplicações de técnicas de gestão ambiental têm reduzido de forma significativa a emissão de resíduos, embora estas reduções limitem-se às necessidades de otimização de seus processos. Apesar dos avanços, ainda são elevados tanto a geração como o despejo de resíduos sem destino adequado, utilizando, principalmente, a água como veículo (DE SENA, 2005).

### 2.1.1 Problemática dos resíduos sólidos

Com o início da atividade agrícola e da produção de ferramentas e armas rudimentares, o descarte dos restos de produção e dos próprios objetos, praticamente não causava impactos ao ambiente, principalmente pelas suas características e baixo volume gerado. Com a mudança brusca na industrialização e o crescimento da população aumentou-se a quantidade gerada e os tipos de resíduos tanto os inertes quanto os perigosos, biodegradáveis ou não biodegradáveis, recalcitrantes ou xenobióticos (OKIDA, 2006 *apud* BIDONE, 1999), causando impactos ao ambiente. Segundo Geyer (2001), os resíduos sólidos (lixo, resíduos de Estações de Tratamento de Efluentes) tornaram-se dentre outros, agentes causadores da poluição nas grandes áreas urbanas. A maior parte destes tem destino incerto e, na maioria das vezes, fica exposta ao meio ambiente, poluindo-o, ou acaba sendo encaminhada, quando estes têm capacidade, aos aterros sanitários urbanos.

Da mesma maneira, Costa (1995) comenta que tanto as gerações como os despejos de resíduos sem destino adequado, são cada vez mais elevadas. Os locais geralmente destinados ao descarte destes resíduos em diversas cidades são poucos e encontram-se em estado de saturação. Novos aterros provocam protestos dos que irão conviver com sua proximidade e ainda, sua inauguração é vista como ônus político pelos administradores. As principais opções encontradas para destinação adequada desses resíduos e a tentativa de redução na sua geração englobam maneiras de restringir na fonte, reuso de certos artefatos, compostagem e reciclagem (BOROWSKI *et al*, 2002).

Ainda segundo o mesmo autor, no Brasil existe a falta de um controle mais rigoroso dos órgãos públicos, muitas vezes os resíduos industriais acabam misturados aos resíduos domiciliares. Como parte dos resíduos industriais tem características incompatíveis com as dos resíduos domésticos, o desempenho do aterro fica prejudicado. Nas regiões metropolitanas existe a tendência de se esgotar, de forma cada vez mais rápida, os espaços para aterros sanitários. Como consequência, pode haver o aumento dos custos de disposição final seja pelo aumento das distâncias para transporte, pelos custos de novas áreas ou pela necessidade de introdução de outros processos tecnológicos como a incineração.

Muitos dos problemas de passivo ambiental enfrentados por empresas atualmente, se devem à disposição inadequada de resíduos. Como a legislação brasileira estabelece que o responsável pela correta destinação seja o gerador, as

empresas não podem simplesmente contratar um terceiro para cuidar de seus resíduos, mas precisam verificar de perto, por meio de inspeções ou auditorias, os procedimentos de seus contratados (BOROWSKI *et al*, 2002).

Por outro lado, transportadores e gerenciadores de sistemas de tratamento e disposição final também são co-responsáveis, e devem estar tecnicamente capacitados para compreender as questões e riscos ambientais envolvidos em suas atividades, bem como possuir todos os recursos necessários. O contratante deve exigir, além dos documentos comerciais de praxe, todas as autorizações pertinentes dos órgãos públicos, e até mesmo certificados de treinamento, quando for o caso.

A gestão dos resíduos sólidos provenientes de processos industriais e de tratamentos de efluentes industriais e sanitários é uma das questões de maior relevância na agenda ambiental da maioria dos países e, particularmente em determinadas regiões, vem se agravando em consequência do acelerado processo de industrialização, em função da diversificação do parque industrial e da geração de ampla gama de tipos de resíduos, aliados à elevação do crescimento demográfico. As aplicações de técnicas de gestão ambiental e gestão da qualidade têm reduzido de forma significativa a emissão de resíduos nas indústrias, embora estas reduções limitem-se às necessidades de higienização de seus processos (DE SENA, 2005). Philippi Jr (2005) explica que o tratamento dos resíduos sólidos procura modificar suas características como quantidade e toxicidade, de forma a diminuir os impactos sobre o meio ambiente e a saúde pública. As alternativas tecnológicas são aplicadas de acordo com as características particulares da composição dos resíduos, do município ou região e dos recursos.

Vários estudos, portanto, vem sendo realizados no sentido de reciclar estes resíduos como uma matéria-prima para produção de outros materiais. De acordo com Gonçalves (2000), a utilização destes resíduos para produzir outros materiais pode reduzir o consumo de energia, as distâncias de transporte que variam em função de onde esteja localizado o resíduo e o mercado consumidor, e também contribuir para a redução da poluição gerada.

No entanto, restrições às suas reutilizações, bem como, às suas questões ambientais vêm sendo impostas pelo mercado consumidor, principalmente do ponto de vista microbiológico e toxicológico.

## 2.2 BIOMASSA: FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA

Knuth (2001) cita que a poluição do ar, danos aos organismos vivos e mudanças no clima global são problemas complexos e diversos. Todavia, todos compartilham uma causa comum - o consumo de energia. Para diminuir os danos às plantas e animais, e evitar a destrutiva mudança de clima, são necessárias mudanças fundamentais na política energética.

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agora, responde por metade do aquecimento global. Para se limitar às emissões de CO<sub>2</sub> serão precisos programas energéticos integrados que sejam menos dependentes de combustíveis fósseis, especialmente carvão e petróleo, e que enfatizem a eficiência energética e fontes renováveis de energia. Desenvolver o uso generalizado de fontes energéticas menos poluidoras, em uma escala global, é uma tarefa difícil, mas também necessária. Segundo Corson (1993), iniciativas para melhorar a eficiência energética, expandir as fontes energéticas renováveis, reverter o desflorestamento, limitar as emissões de dióxido de enxofre e óxidos nitrogenados, eliminar os CFCs, motivar a agricultura sustentável e barrar o crescimento populacional, podem auxiliar a limitar a poluição tão nociva e reduzir o consumo geral de energia.

Esta possibilidade associada à preocupação ocasionada pelas intermitentes crises do petróleo, a qual tem provocado uma conscientização da vulnerabilidade em relação às fontes energéticas mundiais baseadas nos recursos fósseis e não-renováveis (petróleo, carvão mineral e gases naturais), tem sido objeto de estudos

para utilização da biomassa como nova fonte de energia renovável, uma vez que estes possuem características e comportamento frente à combustão semelhante às principais biomassas já utilizadas para tal propósito. Ressaltando, que os combustíveis mais comuns da biomassa são os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia (COUTO et al, 2004; BOROWSKI et al, 2002; BOTÃO e LACAVA, 2003).

Do ponto de vista energético, para fim de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (ADAD, 1982).

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras, etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos sócio-ambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a co-geração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética (ANEEL, 2006). Em condições favoráveis, a biomassa pode contribuir de maneira significativa para com a produção de energia elétrica. Na Tabela 1 estão demonstradas algumas biomassas e seu potencial energético.

Tabela 1: Potencial energético de biomassas.

<i>Combustível</i>	<i>Potência (MW)</i>
Bagaço de cana	391,15
Lenha picada	5,31
Licor negro	310,18
Lixo Urbano	26,3

Fonte: ANEEL, 2006.

Estima-se que com a recuperação de um terço da biomassa disponível de origem agrícola seria possível o atendimento de 10 % do consumo elétrico mundial e que com um programa de plantio de 100 milhões de hectares de culturas especialmente para esta atividade seria possível atendermos 30 % do consumo (AMBIENTE BRASIL, 2005). Outras características interessantes que a biomassa energética possui é a capacidade de gerar empregos no meio rural e o balanço próximo a zero entre o lançamento e a absorção de carbonos na atmosfera, além

disto, possui um espaço relevante no mercado de crédito de carbono, quando o seu final não é para fins energéticos.

Uma tendência mundial para a destinação adequada dos resíduos sólidos diversos (domésticos, industriais, agrícolas, lodos industrial e sanitário) é o processo de incineração/gaseificação, a partir do qual a queima destes resíduos pode ser utilizada para a geração de energia, proporcionando minimização de impactos ambientais (destinação adequada) e principalmente, trazendo vantagens econômicas com relação à aquisição de combustíveis e destinação final. Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa, e dentre os mais bem sucedidos no mundo citam-se o Pró-álcool Brasil; aproveitamento de biogás na China; aproveitamento de resíduos agrícolas na Grã-Bretanha; aproveitamento do bagaço de cana nas Ilhas Maurício; e coque vegetal no Brasil (AMBIENTE BRASIL, 2005). Segundo mesma fonte, no Brasil, cerca de 30 % das necessidades energéticas é suprida pela biomassa sob a forma de lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas; carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustíveis alternativos nas fábricas de cimento do norte e do nordeste; no sul do país queimam carvão mineral, álcool etílico ou metílico para fins carburantes e para indústrias químicas; o bagaço de cana nas usinas de açúcar e álcool e o licor negro nas indústrias de papel são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade. Sistemas que usam lixo urbano (composto por materiais orgânicos, plásticos, papéis, madeira, etc.) para gerar energia também já são conhecidos há muito tempo.

No início da década de 40, a biomassa era responsável por cerca de 80 % da Oferta Interna de Energia – OIE do Brasil, dos quais 81% correspondentes à lenha e 2 % ao bagaço de cana. Com o uso crescente dos derivados de petróleo, logo acompanhados da grande expansão da hidroeletricidade, a biomassa passa a diminuir a participação década após década, conforme apresentado na Tabela 2 (PATUSCO, 2006). Somente a partir de 1976, houve maior interesse na reciclagem quando foi aprovada a Lei de Conservação e Recuperação de Recursos nos EUA, proibindo locais para disposição de lixo a céu aberto (NIR *et al*, 1993).

Tabela 2: Oferta Interna de Energia - %

Fontes	1940	1970	1996
--------	------	------	------

Petróleo e Gás Natural	6,1	33,3	35,2
Carvão Mineral	6,2	3,6	5,2
Hidráulica	4,9	15,8	38,3
Lenha	80,5	42,6	9,6
Produtos da cana	2,3	4,7	10,2
Outras	0,0	0,0	1,6

Fonte: PATUSCO, 2006.

Borowski *et al* (2002) mostram resultados positivos sobre a viabilidade técnica e econômica de um sistema de co-geração de energia utilizando tais resíduos. Segundo Davis e Conwell (1991), com uma recuperação de calor eficiente para geração de energia elétrica, plantas de energia a partir do lixo podem produzir aproximadamente 600 kWh de eletricidade por tonelada de resíduo. No entanto, a queima do lixo para gerar eletricidade não é muito competitiva, havendo mais interesse em sua utilização na geração de vapor em indústrias.

Embora ainda muito restrito, o uso de biomassa para a geração de eletricidade tem sido objeto de estudos, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento. Entre outras razões, estão a busca de fontes mais competitivas de geração e a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono (ANEEL, 2006).

Segundo Campreguer (2005), a aplicação industrial para o lodo ainda é considerada crítica quando a ênfase assumida é o seu baixo poder calorífico, devido principalmente à umidade de material in natura, requerendo preliminarmente desidratação ou um tratamento de secagem, para atingir um teor de sólidos da ordem de 30 a 35%, para a possibilidade de uma combustão auto-sustentável. Entretanto, essa imagem da biomassa está mudando, graças aos seguintes fatores:

- i) Esforços recentes de mensuração mais acurada do seu uso e potencial, por meio de novos estudos, demonstrações e plantas-piloto;
- ii) Uso crescente da biomassa como um vetor energético moderno (graças ao desenvolvimento de tecnologias eficientes de conversão), principalmente em países industrializados;
- iii) Reconhecimento das vantagens ambientais do uso racional da biomassa, principalmente no controle das emissões de CO<sub>2</sub> e enxofre (ROSILLO CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2000 *apud* ATLAS ANEL, 2006).

Com relação à utilização de lodos de efluentes industriais e sanitários, poucos estudos e aplicações são encontrados, tornando-se uma importante fonte de pesquisa uma vez que também são considerados como biomassa de alto poder calorífico, quando possui baixa umidade, e essencialmente de origem orgânica, dos quais se pode gerar energia via combustão direta (DE SENA, 2005).

Werther e Ogada (1996) observaram que fatores que incluem a composição e as propriedades do resíduo, condições da combustão e a composição dos gases afetam de formas diferentes a formação, além das subseqüentes emissões de dioxinas e furanos durante a combustão do lodo de esgoto doméstico.

No entanto, a presença destas substâncias depende da composição da biomassa e do controle dos parâmetros da combustão. Cabe ressaltar ainda que os sistemas que utilizam gás como fonte de aquecimento ou geração de energia, requerem diferentes níveis de purificação. Assim, mesmo com as inúmeras vantagens da combustão de resíduos sólidos de efluentes industriais e sanitários do ponto de vista econômico e energético, fortes motivações políticas devem ser estruturadas para o emprego desta tecnologia como uma forma segura de energia. Para que a combustão desta biomassa seja utilizada como uma energia ambientalmente correta, sua utilização envolve a pesquisa de condições seguras e de rotas alternativas para a disposição, porém, seu principal papel, além da destinação com maior valor agregado destes resíduos, é a redução do uso de outras combustões.

## 2.2.1 ALTERNATIVAS DE APLICAÇÃO DA BIOMASSA

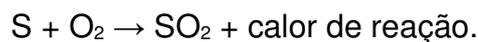
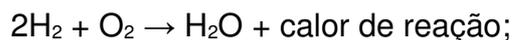
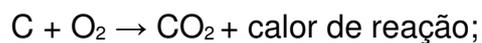
### 2.2.1.1 Combustão

O processo de combustão é uma das tecnologias mais antigas da humanidade e tem sido usada por mais de um milhão de anos. Atualmente, a maior

parte da energia consumida no mundo (por exemplo, em transporte, geração de energia elétrica, aquecimento) é fornecida pelo processo de combustão (CARVALHO e MCQUAY, 2007).

Os mesmos autores comentam que este processo se caracteriza por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor. Em geral, os elementos químicos nos combustíveis responsáveis pela liberação de calor são: carbono, hidrogênio e enxofre. O termo combustão completa é usado para descrever a reação ideal de combustão, quando todo carbono no combustível é oxidado para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), todo hidrogênio para água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e todo enxofre para dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Essas substâncias ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{CO}$ , em alguns casos) compreendem os “gases residuais” da combustão ou “fumo”.

Apesar de se considerar a combustão sempre ser completa para a realização de cálculos estequiométricos, Vlassov (2001) comenta que a combustão também pode ser incompleta. A combustão completa ocorre quando há oxigênio do ar na quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos combustíveis do combustível. Neste caso, no processo de combustão os elementos químicos combustíveis (C, H e S) reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão seguintes:



A energia liberada no processo de combustão normalmente é quantificada pelo poder calorífico de um combustível, o qual é definido como a quantidade de calor despreendido pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível.

Quando a quantidade de calor é medida com os produtos de combustão na fase gasosa, denomina-se de poder calorífico inferior. Caso a água dos produtos de combustão for considerada na fase líquida, ou seja, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, o calor liberado é denominado de poder calorífico superior. A diferença entre os dois valores é a entalpia de vaporização da água, tanto a que é formada na combustão como a que está presente no combustível como umidade.

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada pela combustão completa do combustível, por unidade de massa (kcal/kg)

ou de volume (kcal/m<sup>3</sup>) nas condições normais de temperatura e pressão. O cálculo de PCS (Poder Calorífico Superior) e PCI (Poder Calorífico Inferior) sintetiza assim, o poder calorífico do combustível (DE SENA, 2005). Na tabela 3 pode ser observado o poder calorífico de alguns gases.

Tabela 3: Poder Calorífico de alguns gases

Composto	Fórmula	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]	PCS [kcal/Nm <sup>3</sup> ]	PCI [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	34.400	29.000	3.070	2.580
Monóxido de carbono	CO	2.440	-	3.050	-
Metano	CH <sub>4</sub>	13.250	11.900	9.500	8.530
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12.000	11.230	15.000	14.050
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	12.000	11.600	13.950	13.500

Fonte: JOSE, 2007.

Para uma boa combustão, o combustível deve possuir elevado teor de carbono fixo e material volátil, além de 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<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. A combustão ou incineração de resíduos sólidos emite gases tóxicos, alguns corrosivos, como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e VOC's, além de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares. Se o resíduo possui cloro em sua composição, o mesmo pode resultar na formação de HCl, dioxinas e furanos, e outras espécies organocloradas. Os vapores ácidos provocam corrosão nas caldeiras, e as dioxinas e furanos são extremamente tóxicas, mutagênicas e afetam o sistema imunológico (DE SENA, 2005).

Do mesmo modo Carvalho e McQuay (2007) comentam que para processos de combustão, as quantidades de CO<sub>2</sub> começam a ser um parâmetro importante, uma vez que este gás é um dos responsáveis pelo efeito estufa. Comentam também que a European Environment Agency afirmou que a união européia concordou em reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub> em 8 % até 2012 quando assinou o protocolo de Kyoto. Ao Brasil, por sua condição de país em desenvolvimento, não foram solicitadas medidas para reduzir suas emissões.

De Sena (2005) afirma que, tanto o cloro (Cl) como o enxofre (S) presentes em resíduos sólidos, são fontes de poluentes ácidos durante a combustão, e também são responsáveis pela formação de compostos organoclorados, como dioxinas e furanos. O cloro é essencial para a formação destes compostos, em contraste com a propriedade redutiva do  $\text{SO}_2$  que é conhecida por suprimir a formação de compostos organoclorados.

O  $\text{SO}_2$  é o produto da oxidação do enxofre durante a queima de combustíveis, que poderá formar o  $\text{SO}_3$  ainda nos equipamentos de combustão ou na atmosfera, onde reage com a água produzindo ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), causador da chuva ácida. As emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) além de causarem sérios problemas respiratórios ao homem, ocasionam diversos problemas ambientais, entre eles, a chuva ácida e o *smog* fotoquímico. O monóxido de carbono (CO), formado pela oxidação parcial do carbono, ocasiona baixa eficiência da combustão, e sérios problemas fisiológicos. Seu efeito tóxico é causado, principalmente, pela redução da capacidade da hemoglobina de transportar oxigênio.

Hisdorf *et al.* (2004) descrevem ainda que a “fumaça”, normalmente visualizada em chaminés ou condutores de escape, além dos gases residuais ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e CO) e do “vapor de água”, apresenta ainda partículas de líquidos em suspensão (água ou hidrocarbonetos pesados condensados pelo resfriamento dos gases) e “poeiras” constituídas por partículas sólidas em suspensão (cinzas ou partículas de combustíveis sólidos arrastados pelos gases).

#### 2.2.1.2 Pirólise

A partir da década de setenta, com a crise de energia, a pirólise passou a ser exaustivamente estudada, pois como processo, é um dos menos irreversíveis. Ela permite a recuperação de energia através da decomposição térmica dos detritos, como por exemplo, lodos de estação de tratamento de efluentes, em atmosfera controlada. O processo de pirólise ou carbonização é o mais simples e mais antigo

processo de conversão de um combustível (normalmente lenha) em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente) (ANEEL, 2006).

Enquanto que a combustão acontece através de um conjunto de reações de radicais livres mediante as quais o carbono e o hidrogênio no combustível reagem com o oxigênio formando  $\text{CO}_2$ , água e liberando calor útil, a pirólise caracteriza-se pela degradação térmica do combustível sólido, que pode ser realizada em ausência completa do agente oxidante ou em uma quantidade tal que a gaseificação não ocorra extensivamente (MESA et al., 2003).

A gaseificação, a pirólise e a carbonização, esta última conhecida como pirólise lenta, podem ser consideradas variações de um mesmo processo, conforme mostrado na Tabela 4. O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre  $300^\circ\text{C}$  e  $500^\circ\text{C}$ ), na “quase-ausência” de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido piro-lenhoso. Nos processos de pirólise rápida, sob temperaturas entre  $800^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$ , cerca de 60% do material se transforma num gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono (apenas 10% de carvão sólido), o que a torna uma tecnologia competitiva com a gaseificação. Todavia, a pirólise convencional ( $300^\circ\text{C}$  a  $500^\circ\text{C}$ ) ainda é a tecnologia mais atrativa, devido ao problema do tratamento dos resíduos, que são maiores nos processos com temperatura mais elevada (MESA, 2003; ANNEL, 2006).

Tabela 4: Rendimentos dos produtos típicos obtidos por diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).

		Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	Temperatura moderadas ( $450\text{-}550^\circ\text{C}$ ), curtos tempos de residência dos vapores e biomassa com baixa granulometria.	75%	12%	13%
Carbonização	Baixas temperaturas ( $400\text{-}450^\circ\text{C}$ ), curtos tempos de residência (pode ser de horas ou dias), partículas grandes.	30%	35%	35%
Gaseificação	Alta temperatura ( $900^\circ\text{C}$ ), longos tempos de residência.	5%	10%	85%

Fonte: BRIDGWATER, 2001 apud MESA et Al., 2003.

## 2.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE ALGUMAS BIOMASSAS

### 2.3.1 Lodo originário de esgoto doméstico

Segundo Melo *et al* (2001), o lodo de esgoto é o resíduo proveniente do tratamento das águas servidas (esgotos), com o objetivo de despoluí-las, de modo a permitir seu retorno ao ambiente sem que se tornem agentes poluidores. Em função da origem e do processo de obtenção utilizado, o lodo apresenta composição variável, sendo um material rico em matéria orgânica, em nitrogênio e em alguns micronutrientes. Segundo Journal of the Institution of Water Environmental Management (1989), o lodo de esgoto apresenta-se tipicamente com 98 % de água. Dos sólidos contidos, 70 a 80 % é matéria orgânica incluindo óleos e graxas. Podem ser encontradas quantidades consideráveis de contaminantes, refletindo as características do esgoto bruto do qual ele foi derivado. O volume de lodo gerado depende de alguns fatores, tais como: composição da água residuária a ser tratada; tipo de tratamento; grau de estabilização ou mineralização, e tipo de processo (van VOORNEBURG e van VEEN, 1993).

O esgoto doméstico provém principalmente de residências, estabelecimentos comerciais, instituições ou quaisquer edificações que dispõem de instalação de banheiros, lavanderias e cozinhas. Compõe-se essencialmente da água de banho, excretas, papel higiênico, restos de comida, sabão, detergentes e águas de lavagem.

O lodo gerado do tratamento de esgoto doméstico é considerado contaminado dependendo da concentração de agentes organismos patogênicos e teor de metais pesados. Os organismos patogênicos são inerentes aos esgotos, e conseqüentemente aos lodos provenientes das ETEs. Os lodos de estações de tratamento que recebem apenas efluentes domésticos contêm pequena quantidade de metais pesados provenientes da própria natureza dos resíduos e das canalizações. Porém, podem ocorrer descargas permitidas de efluentes industriais ou de ligações clandestinas na rede, aumentando a carga poluidora, concentrando maior quantidade de metais pesados no lodo (ANDREOLI *et al*, 1997).

Andreoli *et al* (2001) afirma que existem poucos relatos de pesquisas realizadas no Brasil para quantificar a produção de lodo em unidades de tratamento de esgoto. Dentre elas pode-se destacar o estudo conduzido por Machado (2001) *apud* Andreoli *et al* (2001) em 275 ETE's no território nacional. Considerando-se a população de 28.877.974 habitantes atendidos pelas 275 ETE's e a contribuição média *per capita* de 33 kg de sólidos suspensos totais (SST) por ano, a produção de lodo foi estimada neste estudo em 151.724 ton SST por ano.

O destino final do lodo gerado em ETE envolve estudos e decisões relativos ao seu condicionamento e estabilização, grau de desidratação, forma de transporte, eventual reuso, eventuais impactos e riscos ambientais, e aspectos econômicos desta destinação. Entre as conseqüências de práticas inadequadas de disposição do resíduo, estão a redução da eficiência técnica da ETE, a degradação dos recursos naturais e as conseqüências sobre o perfil sanitário da população.

Existem várias alternativas para o tratamento do lodo. A mais comum é a digestão anaeróbia que pode ser seguida pela destinação final em aterros sanitários exclusivos, a disposição em superfície, a disposição oceânica, lagoas de armazenagem, a incineração ou a reciclagem agrícola (JORDÃO, 1995; ANDREOLI, 1997).

A previsão da evolução da produção de lodo de esgoto no Brasil é um tanto difícil, tendo em vista o grau de desenvolvimento e da evolução da população nas

diferentes regiões do país. Entretanto, não há a menor dúvida que, tendo em vista o crescimento dos grandes centros urbanos e o desenvolvimento das regiões, para onde se dirigem algumas indústrias, aliado à expansão da consciência ecológica, é possível prever um aumento considerável, nos próximos anos, na criação de novas estações de tratamento, com o conseqüente aumento da produção de lodo de esgoto (MELO et al, 2001).

A Tabela 5 apresenta resultados da composição média do lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) no Brasil.

Tabela 5: Composição média do lodo de ETE no Brasil.

Parâmetros	Valor Médio no Brasil <sup>(1)</sup>
pH	11,6
Material seco, MS (%)	57,86
Nitrogênio total, N (%)	1,07
Carbono total, C (%)	12,56
Relação C/N	13,32
Fósforo total, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,26
Potássio, K <sub>2</sub> O (%)	0,16
Cálcio total, CaO (%)	19,85
Magnésio total, MgO (%)	3,17
Cádmio (mg/kg MS)	0,57
Zinco (mg/kg MS)	28,99
Cobre (mg/kg MS)	73,73
Cromo (mg/kg MS)	28,11
Mercúrio (mg/kg MS)	0,52
Níquel (mg/kg MS)	18,06

Fonte adaptada: Malta, 2001 apud Andreoli et al, 2001.

(1) Tratamento Aeróbio

Segundo a Comunidade Européia (2006), a aplicação de lodo gerado de tratamento de efluentes em culturas agrícolas tem sido largamente difundida na Europa, especialmente no Reino Unido, visando a redução de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Porém, a presença de metais pesados constitui uma das principais limitações ao uso do lodo na agricultura. De modo geral, as concentrações de metais encontradas no lodo são muito maiores que as naturalmente encontradas em solos, daí a necessidade de avaliação dos riscos associados ao aumento desses elementos no ambiente em decorrência da aplicação desse resíduo, admitindo soluções combinadas de acordo com as características próprias da região em que se

localizam as estações de tratamento, podendo abranger um âmbito apenas local ou regional (JORDÃO, 1995; NASCIMENTO *et al*, 2004).

Outra forma de reduzir o volume de lodos de esgotos gerados é a incineração (redução em torno de 85% do volume inicial). Este processo apesar de ser de custo elevado, traz como benefício além de necessitar de uma menor área de disposição, a possível utilização da cinza na construção civil, devido à eliminação da matéria orgânica, bem como, a possibilidade de gerar energia (FONTES, 2003).

### 2.3.2 Lodo originário da indústria de papel e celulose

A produção industrial de papel e celulose é muito exigente em termos de insumos e energia. Por isso, indústrias deste setor vêm intensificando o reaproveitamento máximo da energia e matérias-primas e minimizando os resíduos quando possível. Apesar da disposição final dos lodos gerados no processo de fabricação do papel ser em aterros industriais, muitos países ainda não descartam desta maneira, e também não observam o desperdício energético contido neste lodo (ORAL *et al*, 2005).

De acordo com Braile e Cavalcanti (1993), na indústria de celulose e papel os despejos são produzidos em duas etapas gerais: preparo da polpa-celulose e fabricação de papel. A primeira etapa consiste em descascar e cortar a madeira em toras, picar estas toras e transformá-las em polpa-celulose, por um dos seguintes métodos: pasta mecânica, pasta sulfato, pasta sulfito, pasta soda ou métodos diversos.

Os mesmos autores afirmam que o emprego do sulfato ou processo kraft, diminui o custo de fabricação da polpa-celulose, porque permite a recuperação de produtos químicos e calor, partindo da queima do licor-negro, originado no cozimento. Em virtude disto, os efluentes da fabricação de celulose pelo processo kraft, contêm pouca lignina e produtos químicos. Tal processo utiliza soluções

alcalinas para dissolver a lignina e outras partes não celulósicas da madeira, tendo como vantagem a produção de uma celulose de alta qualidade. As principais fontes de despejos na produção de celulose kraft, são as descargas dos digestores, vazamentos de lixívia-negra, respingos, sistema de resfriamento, evaporadores múltiplos efeitos, lavagem de resíduos de cal, lavagem dos filtros de lixívia e lavagem dos fornos de cal e de gás.

O principal resíduo sólido gerado na indústria de celulose e papel é o lodo oriundo da estação de tratamento de efluentes. Em virtude da grande quantidade de lodo gerada diariamente e pelo pouco espaço em aterros industriais, o resíduo causa um efeito desfavorável sobre o desenvolvimento da indústria de papel. O lodo desta indústria consiste em: materiais fibrosos orgânicos e materiais argilosos inorgânicos e depende das características do processo, podendo variar de uma unidade fabril para outra, mesmo nos casos em que os produtos finais são semelhantes (CAMPREGHER, 2005).

Segundo o mesmo autor, o lodo da indústria de papel pode ser dividido em várias categorias: lodo primário (resíduo proveniente da produção de fibras virgens de madeira); lodo de destintamento (resíduo de lodo da produção de papel pós-uso por remoção das tintas das fibras); lodo secundário (o lodo ativado do sistema biológico) e lodo combinado (resíduo da produção de papel com lodo ativado).

O lodo das unidades de decantação primária, geralmente não requer adensamento adicional antes da secagem que pode ser feita por meio de leito de secagem de lodo, filtro rotativo a vácuo, centrífuga e filtro-prensa (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

O lodo dos decantadores secundários contém apenas 1 % de sólidos, com o emprego de adensadores por gravidade, o teor de sólidos aumenta para 3 %. Se não for possível obter o adensamento por gravidade, o lodo secundário pode ser misturado e seco com o lodo primário. Também é possível obter seu adensamento por meio de flotação por ar dissolvido ou centrifugação. Pela flotação, obtém-se lodo com 4 a 5% de sólidos e pela centrifugação com 5 a 8%.

Os lodos resultantes do tratamento biológico podem ser secos quando combinados com lodos de decantador primário. Quando lodos primários ou combinados forem secos por filtros rotativos à vácuo obtém-se uma torta com teor de sólidos de 20 a 30%. Pode-se adotar também o processo de centrifugação, obtendo uma torta com 20 a 35% de sólidos (BRAILE e CAVALCANTI, 1993).

Os níveis de metais pesados do lodo de processo de papel recuperado são geralmente baixos. O lodo de destintamento tem menor quantidade de metais pesados do que os de tratamento de águas residuárias de municípios. A concentração de cádmio e mercúrio é insignificante e algumas vezes apresentam valores menores que os limites de detecção (CAMPREGHER, 2005).

A Tabela 6 mostra a quantidade geral de lodo gerado em função do tipo de processo produtivo.

Tabela 6 - Geração de lodo por categoria de produção.

Categoria de Produto	kg sólidos/ton produção
Polpação química	9 – 68
Pasta mecânica / papel impressão e outros	9 – 45
Semiquímico / meio corrugado	9 – 27
Destintamento / papéis finos e higiênicos	36 – 136
Fábrica não-integrada / papéis finos	9 – 36
Papelão reciclado	0 – 27

Fonte: Instituto Ambiental do Paraná (1996) *apud* LIMA G. *et al.*, 1998.

Yu *et al* (2002), em seu trabalho sobre o estudo cinético de queima e pirólise de lodo de estação de tratamento de efluentes de uma empresa produtora de papel kraft, caracterizaram o lodo e determinaram o valor de carbono elementar de 39,82 %, enquanto que de nitrogênio e enxofre elementar foram menores que 1 % de massa seca. A umidade total superou os 50 %, enquanto que os sólidos voláteis foram acima de 20 % e cinzas de 14 %. Na Tabela 7 podem ser observados todos os resultados dessa caracterização.

Tabela 7: Composição físico-química de lodo de celulose e papel

Parâmetros	Resultados
C (%)	39,82
H (%)	4,53
O (%)	19,22
N (%)	0,7
S (%)	0,11
Umidade (%)	59,80
Material volátil (%)	22,19
Carbono Fixo (%)	3,70
Cinzas (%)	14,31

Fonte adaptada: Yu *et al* (2002).

De acordo com Caputo e Pelagagge (2001), o lodo de papel e celulose pode ser utilizado como combustível em incineradores visando sua redução, como também, a geração de energia. O processo de incineração gera certa quantidade de resíduos sólidos. Considerando-se um balanço mássico no incinerador, tem-se que, a cada 1.000 kg de resíduo queimado, é produzido em torno de 30 kg de cinzas voláteis e 300 kg de partículas mais pesadas (BARBIERI *et al.*, 2000b *apud* MENEZES *et al.*, 2002).

Para Götttsching e Pakarinen (2000), quando se trata do ganho energético da incineração durante a queima, este pode ser nulo ou até negativo se o teor de sólidos do lodo estiver abaixo de 40% ou se o conteúdo de compostos inorgânicos for elevado.

Devido ao valor de aquecimento e ao baixo conteúdo de substâncias prejudiciais, muitos tipos de resíduos do processo da indústria de papel e celulose são adequados para a recuperação de energia. A Tabela 8 apresenta a comparação entre os diversos tipos de resíduos gerados nesta indústria com relação ao poder calorífico, conteúdo de cinzas e conteúdo de água.

Tabela 8 - Comparação entre os diversos tipos de resíduos, em relação ao poder calorífico, conteúdo de cinzas e conteúdo de água.

Fonte de energia	Poder calorífico [MJ/kg]	Conteúdo de cinzas [%]	Conteúdo de água [%]
Madeira (seca-ar)	14 - 17	< 1	10 - 20
Lodo de destintamento (úmido)	7 - 10	40 - 60	40 - 60
Rejeitos (úmido)	16 - 23	8 - 12	20 - 50
Lodo biológico (úmido)	7 - 9	20 - 40	70 - 85

Fonte: GÖTTSCHING e PAKARINEN, p. 520, (2000)

A energia térmica do lodo é usualmente recuperada em incineração ou convertida em fertilizantes orgânicos e ainda, em alguns casos, reciclados novamente no processo produtivo. Algumas indústrias já estão incinerando seu lodo visando resolver o problema da insuficiência de espaços em aterros. No entanto, materiais não combustíveis do lodo constituem-se em 30%, mesmo assim são coletados em forma de cinzas após a incineração e vão para os aterros, em quantia considerável. Também visando a solução para esse problema, desenvolveram-se técnicas para utilizar o lodo e as cinzas de co-geração: a produção de agregado leve com diferentes porcentagens de lodo da indústria de papel; e produção agregada

leve com cinzas; e ainda a incorporação em cerâmica estrutural com as cinzas de co-geração da indústria de papel (CHIN-TSON LIAW *et al.*,1998).

### 2.3.3 Lodo originário da indústria têxtil

A indústria têxtil é uma das maiores consumidoras industriais de água e produtora de lodo oriundo de suas estações de tratamento de efluente (ASIA, 2006). Knuth (2001) relata que estudos realizados em várias estações de tratamento de efluentes têxteis, indicaram que o lodo nas indústrias de Santa Catarina fica em torno 5,0 Kg lodo/m<sup>3</sup> de efluente representando mais de 30.000 toneladas de lodo gerados mensalmente só neste setor industrial. Em decorrência do grande volume de produção, também vultoso é o volume de resíduos gerados nos processos de produção destas indústrias. Assim, seus efluentes incorporam substâncias provenientes de todas as etapas do beneficiamento de fibras têxteis tais como: desengomagem, lavagem, alvejamento, tingimento, estamparia, dentre outros.

Segundo a Companhia Pernambucana do Meio Ambiente (2001), em levantamento realizado pelo SENAI/CETIQT em indústrias têxteis que dispõem de tratamento de efluentes líquidos, em 1990, observa-se que:

- cerca da metade das indústrias dispõem de tratamento físico-químico (coagulação/floculação com separação do lodo formado por flotação ou

sedimentação), precedido de unidades preliminares (gradeamento, desarenação, peneiramento, equalização e neutralização);

- cerca de 1/3 das indústrias dispõem de tratamento físico-químico, precedido de etapas preliminares e seguido de tratamento biológico, a maioria com lodos ativados;

- cerca de 1/4 das indústrias dispõem de tratamento biológico (lodos ativados), precedido de etapa preliminar.

O mesmo autor apresenta um levantamento realizado pela empresa CLEV Engenheiros Associados S/C Ltda, na região de Blumenau-SC, em 14 indústrias têxteis que dispõem de tratamento de efluentes, em 1997, onde observou-se que:

- 7 delas dispõem de tratamento biológico (lodos ativados) com remoção de cor simultânea;

- 2 delas dispõem de tratamento biológico com remoção de cor posterior (polimento);

- 5 delas dispõem de tratamento biológico precedido de remoção de cor.

Na Tabela 9 é possível observar a caracterização físico-química do lodo de estação de tratamento de efluente têxtil.

Tabela 9: Caracterização de lodo têxtil

Parâmetros	Resultados
DQO (mg/L)*	39326
Densidade (g/mL)*	1,090
Teor de umidade (%)*	94,5
Teor de Sólidos Totais (mg/L)*	42899
Sólidos Fixos (%)*	49,9
pH *	4,46
Sulfetos (mg/L)*	62,6
SiO <sub>2</sub> (%)**	3,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)**	11,50
SO <sub>x</sub> (%)**	3,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)**	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)**	6,05
Cl (%)**	0,34
TiO <sub>2</sub> (%)**	0,34
MgO (%)**	0,22

K <sub>2</sub> O (%)**	0,006
CaO (%)**	0,022
ZnO (%)**	0,025
CuO (%)**	0,052

Fonte adaptada: \*Colanzi e Pietrobon (2002) e \*\*Mendes *et al* (1998) *apud* Mendes (1997)

O lodo biológico têxtil é de composição variável e normalmente possui teores elevados de matéria orgânica, nitrogênio (N), fósforo (P) e micronutrientes. Além disso, contém corantes com metais pesados e agentes patogênicos (BALAN e MONTEIRO, 2001; MARTINELLI *et al.*, 2002). Este lodo, oriundo da prensagem do material decantado nas estações de tratamento de efluentes, pode ainda conter metais pesados e outros componentes tóxicos, uma vez que, nos processos têxteis e no tratamento de efluentes, são usados produtos tais como: soda, polímeros, corantes, sais ácidos, gomas, sulfato de alumínio, sulfato de ferro e cal, dentre outros, sendo assim considerado, segundo a ABNT NBR 10.004, um resíduo sólido de classe II A – não inerte, não podendo ser descartado na rede de esgotos ou em corpos de água (PRIM, 1998; COLANZI E PIETROBON, 2002).

Colanzi e Pietrobon (2002) afirmam que no lodo têxtil ocorre presença em altas concentrações de alumínio (7689,5 mg/L), ferro (186,78 mg/L), sódio (316,997 mg/L), e silício (381,5 mg/L). Obtiveram também a caracterização térmica do material, tendo como resultados: condutividade térmica igual a 0,641 W/m.K e calor específico médio igual a 3,23 kJ/Kg.K.

## 2.4 ASPECTOS AMBIENTAIS

As emissões atmosféricas num espectro geral das plantas de incineração variam com o conteúdo de poluente. Os mais importantes são os materiais

particulados, dióxido enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), (...) assim como dióxinas e furanos (GÖTTSCHING e PAKARINEN *et al.*, 2000).

A Resolução CONAMA 05/89 considera a necessidade de adoção de padrões nacionais de qualidade do ar como ação complementar e referencial aos limites máximos de emissão estabelecidos (CONAMA, 1989). Ela considera, portanto, os padrões de qualidade do ar como instrumentos de apoio e operacionalização do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR. A mesma resolução ainda afirma que se deve limitar os níveis de emissão dos poluentes por fontes, com os seguintes objetivos:

- Melhorar a qualidade do ar;
- Atender aos padrões estabelecidos;
- Não comprometer a qualidade do ar em áreas não degradadas.

As estratégias básicas de controle, segundo a resolução, deve priorizar o controle das emissões por tipologia de fontes e poluentes primários (material particulado, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e HCO), sem deixar de avaliar as influências dessas emissões em relação aos padrões de qualidade do ar (COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE, 2001).

A resolução CONAMA 03/90 regulamentou, no Brasil, os padrões de qualidade do ar para os seguintes parâmetros: partícula total em suspensão, fumaças, partículas inocula, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio, cujos limites estão resumidos na Tabela 10 (CONAMA, 1990).

Os padrões brasileiros seguem a mesma classificação dos padrões americanos, podendo ser de dois tipos: primários e secundários (OLIVEIRA, 1997): Os padrões primários são níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo em metas de curto e médio prazo. Já os padrões secundários são níveis desejados de concentrações de poluentes constituindo-se em metas de curto prazo.

Tabela 10: Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

Poluente	Tempo de	Padrão Primário	Padrão Secundário
----------	----------	-----------------	-------------------

	Amostragem	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Partículas Totais em Suspensão	24 horas (1)	240	150
	Anual – MGA	80	60
Dióxido de Enxofre	24 horas (1)	365	100
	Anual – MMA	80	40
Monóxido de Carbono	24 horas (1)	40.000	40.000
	08 Horas corridas (l)	10.000	10.000
Ozônio	1 hora	160	160
Fumaça	24 horas (1)	150	100
	Anual – MMA (3)	60	40
Partículas Inaláveis	24 horas (1)	150	150
	Anual – MMA (3)	50	50
Dióxido de Nitrogênio	01 hora (1)	320	190
	Anual – MMA (3)	100	100

Fonte: CETESB, 2002

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

(2) Média geométrica anual

(3) Média aritmética anual

A resolução 08/1990 do CONAMA estabeleceu limites máximos de emissões de poluentes do ar em fontes fixas de poluição, como também definiu como sendo fontes fixas toda a queima de substâncias combustíveis realizada em equipamentos, tais como, caldeiras, geradores de vapor, centrais para a geração de energia elétrica, fornos, fornalhas, estufas e secadores para geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores.

A mesma resolução determinou que para fontes fixas com potência nominal total igual ou inferior a 70 MW em áreas a serem atmosféricamente conservadas (lazer, turismo, estâncias climáticas hidrominerais e hidrotermais), os índices de emissão de partículas totais é de 120 g por milhão de quilocalorias e de dióxido de enxofre (SO) de 2000 g por milhão de quilocalorias.

A partir de 2006, através da Resolução 382/2006 do CONAMA, estabeleceu-se limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas em algumas atividades industriais especificamente, como também a normatização da metodologia para determinação de limites de emissão para cada planta geradora. Esta resolução, além de determinar limites de emissões de atividades produtivas, engloba a geração de calor a partir da combustão de biomassas, tais como bagaço de cana-de-açúcar e derivados da madeira.

O estado de Santa Catarina, através da Fundação de Meio Ambiente – FATMA, estabeleceu por forma de decreto de número 14.250, de junho de 1981, os seguintes padrões no artigo 28:

*I – para partículas em suspensão:*

- a) 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração média geométrica anual; ou
- b) 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração média de 24 horas consecutivas, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano;

*II – para Dióxido de Enxofre:*

- a) 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração média aritmética anual;
- b) 365  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração média de 24 horas consecutivas, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano;

*III – para Monóxido de Carbono:*

- a) 10.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração da máxima média de 8 horas consecutivas, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano; ou
- b) 40.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração da máxima média de 1 hora consecutiva, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano; e;

*IV – para oxidantes fotoquímicos:*

- a) 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ou valor inferior-concentração da máxima média de 1 hora consecutiva, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano.

O artigo 30 da mesma norma também afirma que é proibida a emissão de fumaça, por parte de fontes estacionárias, com densidade colorimétrica superior ao padrão I da Escala de Ringelmann, salvo por:

I – um único período de 15 minutos por dia, para operação de aquecimento de fornalha; e

II – um período de 3 minutos, consecutivos ou não, em qualquer fase de uma hora.

### **3 MATERIAIS E MÉTODO**

#### **3.1 ORIGEM DAS BIOMASSAS (LODOS)**

Foram empregados neste estudo amostras de três lodos de estações de tratamento de efluentes distintas, sendo um doméstico, originário da SAMAE –

Agência Municipal de Água e Esgoto de São Bento do Sul - SBS, e dois industriais, um de indústria têxtil, da empresa Döhler S.A de Joinville - SC e o outro proveniente de processo de papel e celulose, da empresa Rigesa LTDA, localizada na cidade de Três Barras – SC.

A composição dos sistemas de tratamento de efluentes que originaram os três lodos analisados é apresentada a seguir visando o conhecimento da geração dos mesmos e suas diferenças para discussão posterior.

A estação de tratamento de efluentes domésticos é composta por gradeamento, desarenador, reator anaeróbico de leito fluidizado (RALF), lagoa de aeração (lodo ativado), lagoas de decantação, adensador de lodo e leitos de secagem, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 2.

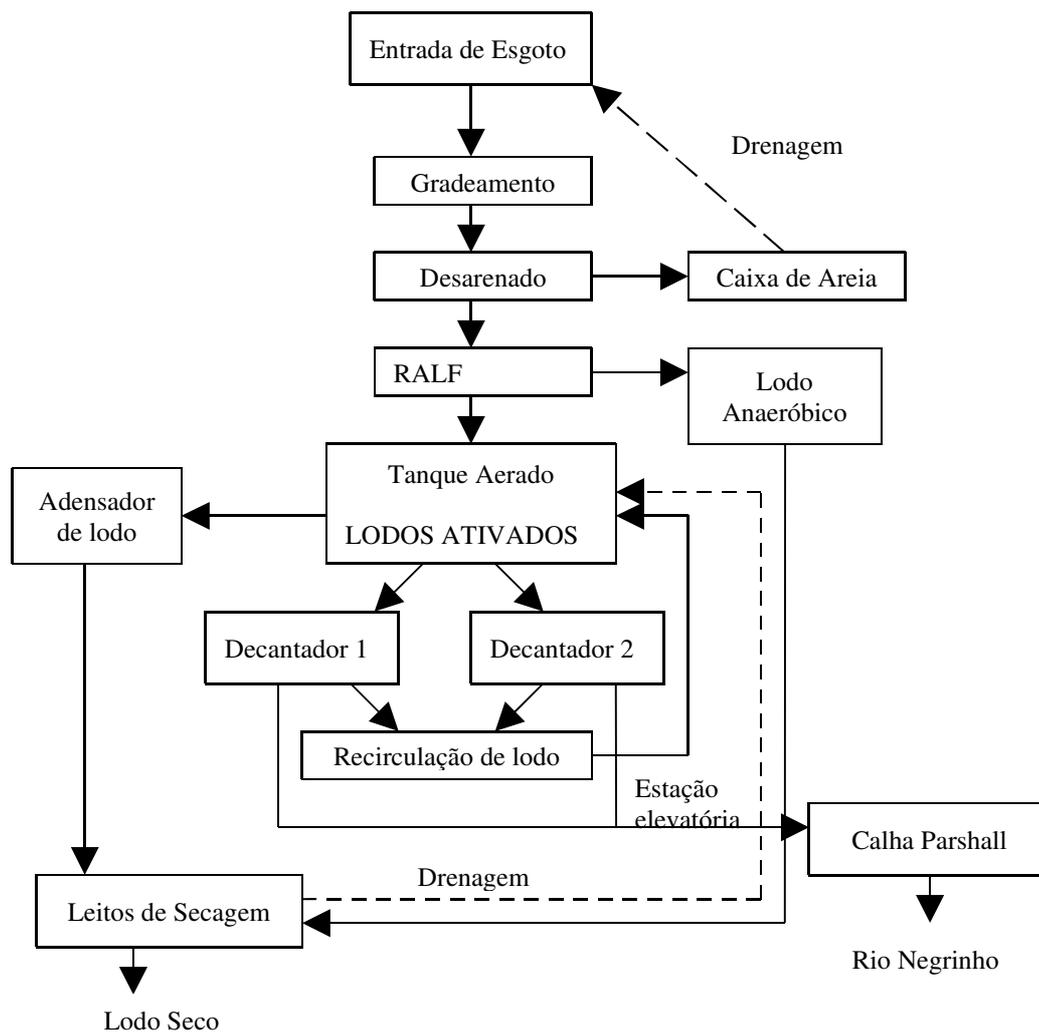


Figura 2: Fluxograma da ETE de esgoto doméstico.  
Fonte: SAMAE (2007)

Quanto ao lodo têxtil, este é gerado em estação de tratamento de efluentes composta por peneira estática, tratamento físico-químico, lagoas de aeração (lodo ativado), decantador de lodo e filtro-prensa, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.

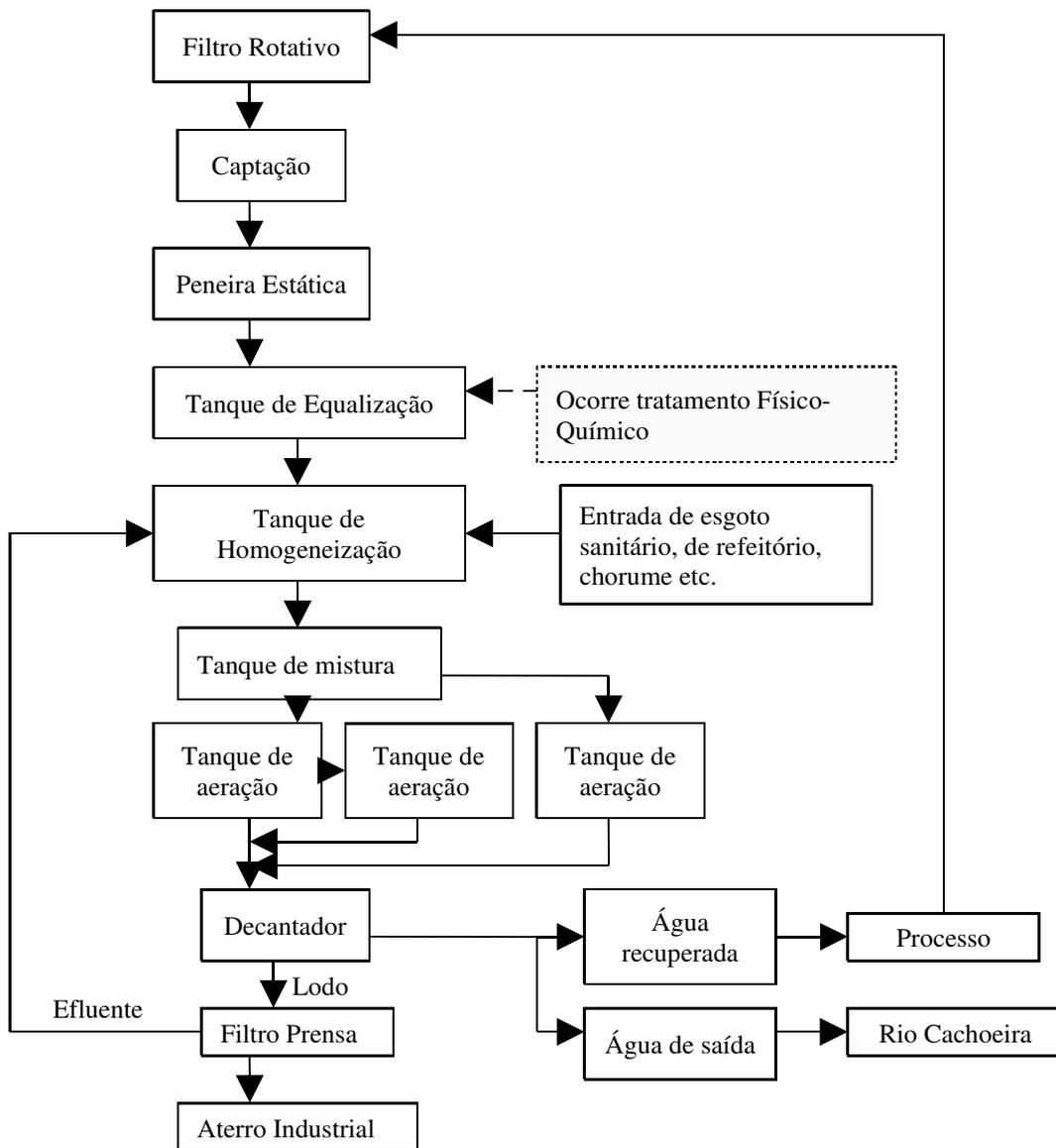


Figura 3: Fluxograma da ETE de indústria têxtil.  
 Fonte: Döhler S.A. (2007)

A estação de tratamento de efluentes da indústria de celulose e papel é composta de tratamento físico-químico, decantador (clarificador), uma lagoa de aeração e duas de decantação e filtro-prensa, conforme pode ser visualizado no fluxograma da Figura 4.

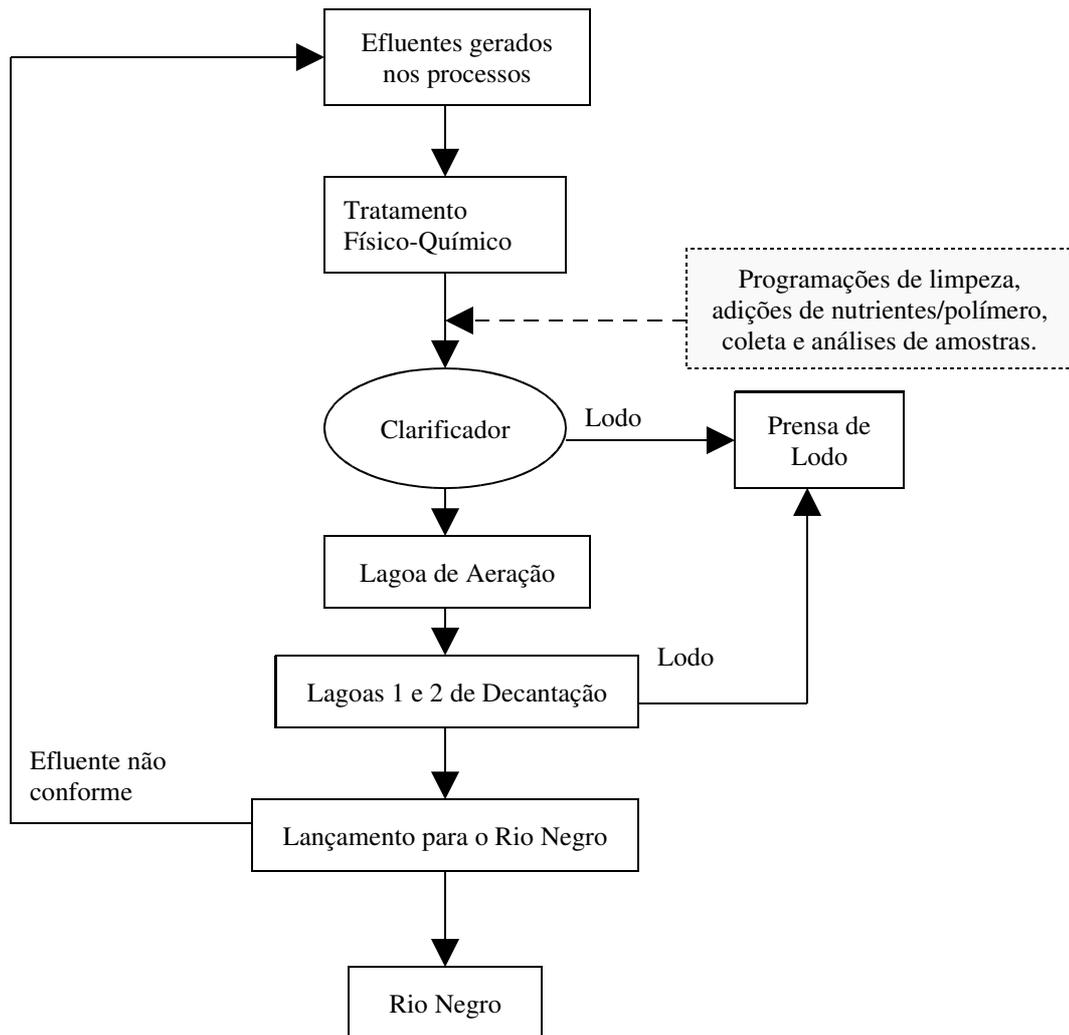


Figura 4: Fluxograma da ETE da indústria de celulose e papel.  
Fonte: Rigesa S.A. (2007)

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS (LODOS) UTILIZADAS

Inicialmente, uma amostra de 200 g de cada lodo foi seca em estufa (QUIMIS – 317B242), à temperatura de 105 °C durante 24 horas, e deixando-se secar até temperatura ambiente em dessecador. Após esse tratamento, cada amostra seca de lodo foi empregada nas análises apresentadas neste capítulo, com exceção da

determinação do teor de sólidos totais. A metodologia empregada nestas análises foi baseada no Standard Methods (2000).

### 3.2.1 Teor de Sólidos Totais

Utilizando cadinho limpo ( $M_i$ ), seco e previamente tarado, mediu-se 3 gramas da amostra *in natura* ( $M_u$ ) em balança analítica (METTLER – AE240), colocando-a para secar a 105°C em estufa (QUIMIS – 317B242) por 1 hora. Em seguida, deixou-se em dessecador até atingir a temperatura ambiente, quando então foi medida a massa final ( $M_s$ ). Com os valores encontrados utilizou-se a Equação 01 para a determinação da quantidade de massa seca em relação à massa úmida. Essas medições foram feitas em triplicata.

$$\text{Sólidos Totais} = \frac{M_u - M_i}{M_s - M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 01})$$

### 3.2.2 Teor de sólidos fixos e sólidos voláteis

Nesta análise foram utilizadas 1,5 g da amostra seca de cada lodo ( $M_t$ ) em cadinho seco ( $M_s$ ), sendo levadas ao forno mufla (EDG - 3000) a 550°C por 1 hora. Depois deste período, colocou-se em dessecador até temperatura ambiente e pesou-se para obtenção da massa calcinada ( $M_c$ ). Empregando-se os valores obtidos na Equação 02, foi determinado o teor de sólidos fixos de cada lodo. As análises foram realizadas em triplicata.

$$\text{Sólidos fixos (\%)} = \frac{M_c}{M_t} \times 100 \quad (\text{Equação 02})$$

A partir dos resultados obtidos, empregou-se a Equação 03, determinando-se assim o teor de sólidos voláteis de cada lodo.

$$\text{Sólidos voláteis (\%)} = \left( \frac{((M_t + M_s) - M_c)}{(M_t + M_s) - M_s} \right) \times 100 \quad \text{Equação 03}$$

### 3.2.3 Análise Elementar

Três amostras previamente secas de 5 g, uma de cada lodo, foram encaminhadas para realização da análise elementar em laboratórios externos.

As porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio elementar foram determinadas por meio do analisador CHN Perkin-Elmer, pelo laboratório de análise elementar do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, enquanto que o enxofre elementar foi determinado por espectrometria de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES) no equipamento da marca Spectro Ciros CCD, pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo - USP.

Ressalta-se que, realizou-se apenas a quantificação destes elementos, pois os mesmos são os principais participantes nas reações de oxidação durante a queima das amostras.

### 3.2.4 Estudo do comportamento térmico

O estudo do comportamento térmico das amostras secas dos lodos foi feito pelo Laboratório de Materiais do SENAI – Criciúma/SC, a partir de 5 g de cada material. Foram realizadas análises termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD), simultaneamente, através do termoanalisador da marca NETZSCH, modelo STA - 409 EP. As amostras foram submetidas ao analisador térmico sob duas atmosferas: uma em meio oxidante, usando ar sintético, com 79% de N<sub>2</sub> e 21% de O<sub>2</sub>, para avaliar a combustão, e a outra em meio inerte, empregando argônio para avaliar a pirólise. As demais condições foram mantidas iguais para os dois processos: taxa de aquecimento de 10°C por minuto, faixa de aquecimento da temperatura ambiente à 1100°C e fluxo de gás de 70 cm<sup>3</sup>/min.

### 3.2.5 Determinação do poder calorífico

Este estudo foi realizado pelo Núcleo de Extensão e Prestação de Serviços do Departamento de Química – ICEX/ UFMG.

Amostras secas de cada lodo foram pulverizadas em graal de ágata, homogeneizadas, dispostas em vidros de relógio e mantidas por 24 horas em estufa (100-110°C) antes da coleta de alíquotas (cinco para cada amostra) para os ensaios de poder calorífico. Após a combustão em calorímetro Parr modelo 1241 padronizado com ácido benzóico, determinou-se a massa do resíduo (material não combustível) e procedeu-se a correção associada à formação de ácido nítrico.

### 3.3 ANÁLISE DOS GASES GERADOS NA QUEIMA DAS BIOMASSAS

Uma amostra seca de 20 g de cada lodo foi colocada em estufa Mufla (modelo 3000 da marca EDG), a 900 °C durante uma hora, considerada após sua estabilização nesta temperatura. O procedimento foi realizado em triplicata.

A medição dos gases CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> gerados após a queima foi realizada pelo método Orsat, enquanto que a emissão de NO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> foi medida pelo analisador portátil de gases combustíveis da marca TESTO, modelo 335.

Para a realização do método Orsat utilizou-se a metodologia do Manual de Procedimentos (1999). Na Figura 5 pode ser observada a mufla interligada ao aparelho Orsat, enquanto que a Figura 6 apresenta essa interligação com o analisador eletrônico.



Figura 5: Aparelho Orsat utilizado na análise dos gases.



Figura 6: Equipamento TESTO - coleta e análise dos gases.

O método Orsat consiste na determinação da concentração de oxigênio residual como também de monóxido e dióxido de carbono, gerados a partir da sua absorção em frascos contendo hidróxido de potássio (frasco um), pirogalol e hidróxido de potássio (frasco dois) e cloreto cuproso, cloreto de amônio e hidróxido de amônio (frasco três). Para a realização do experimento também foi necessário o uso de uma bomba pneumática da marca Chemap AG e modelo Single pump.

Este estudo da análise dos gases gerados na queima das biomassas foi realizado no laboratório de poluição atmosférica da Universidade da Região de Joinville - Univille

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização Físico-Química das Biomassas (lodos)

#### 4.1.1 Análise Elementar

Na Figura 7 são apresentados os resultados da análise elementar para determinação dos percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre dos lodos investigados.

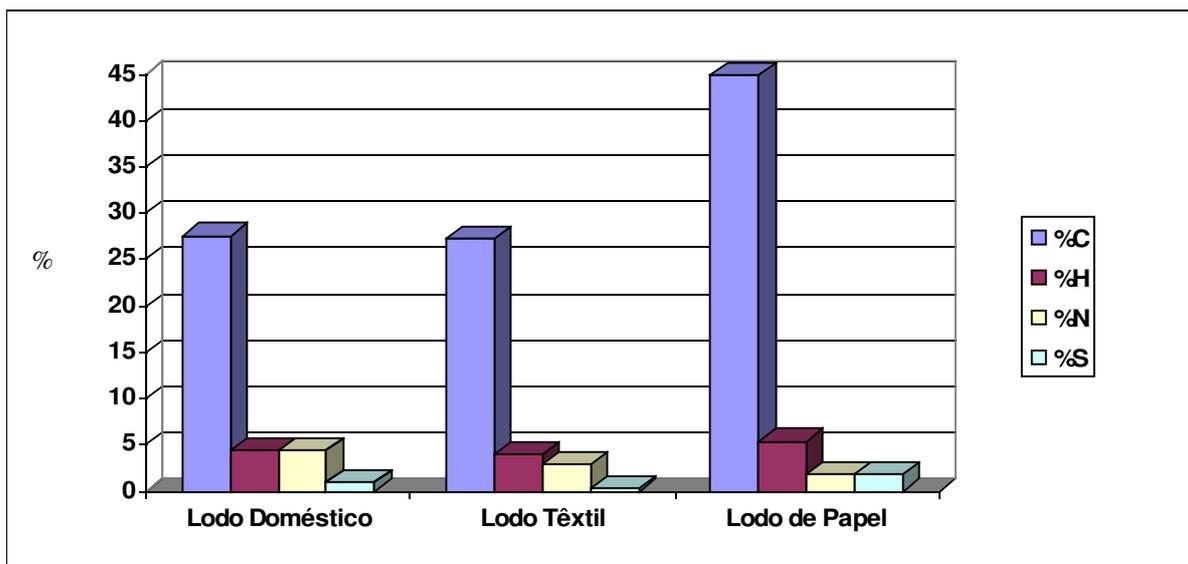


Figura 7: Resultados da análise elementar dos lodos.

Pela análise da Figura 7 verifica-se que o lodo de papel e celulose apresentou valor em torno de 40 % a mais de carbono em sua composição comparado aos

outros dois, que apresentaram entre si valores similares, e cerca de 50% e 80% superior quanto à presença de enxofre em relação aos lodos sanitário e têxtil, respectivamente. Esse valor elevado de carbono reflete a matéria-prima celulósica que dá origem ao lodo resultante da fabricação de papel, enquanto que o enxofre tem como fonte os insumos empregados no processo em si.

O percentual de hidrogênio pode ser considerado equivalente nos três lodos e quanto ao teor de nitrogênio, a maior concentração se deu no lodo doméstico, o que era esperado em função das características de sua origem em dejetos humanos, sendo seu percentual cerca de 65 % e 60 % superior, respectivamente, em relação aos lodos têxtil e de papel e celulose.

Na Figura 8 os resultados da análise elementar são comparados com os valores obtidos por Andreoli (2001) para lodo doméstico, Silva *et al.* (2003) para lodo têxtil e Yu *et al.* (2002) para o de papel e celulose.

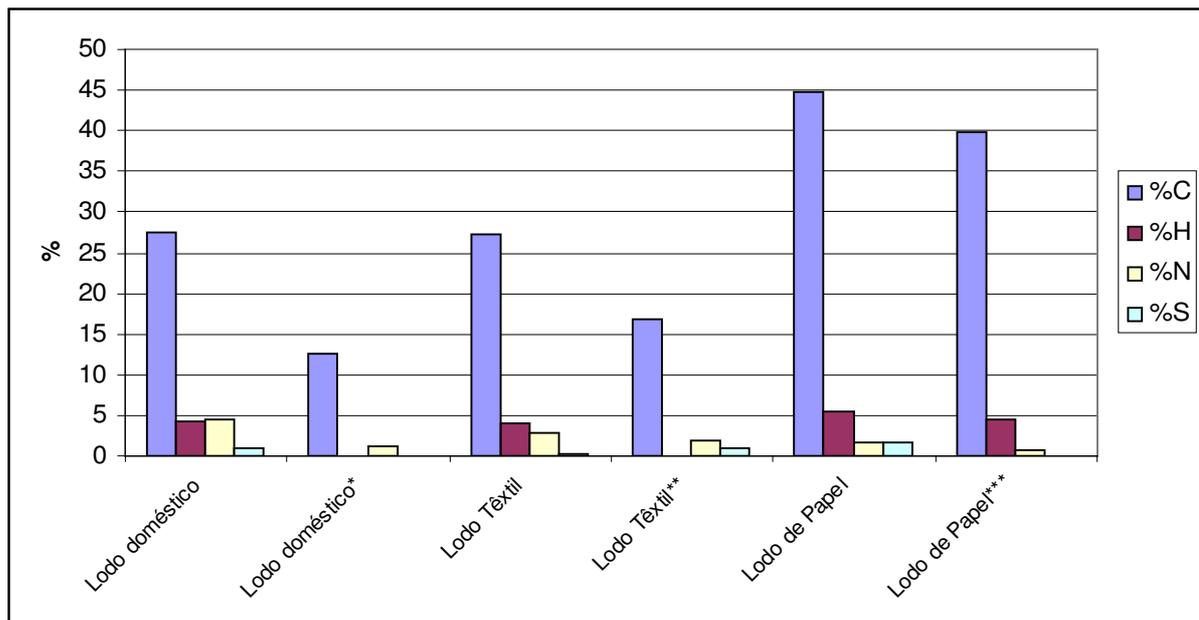


Figura 8: Comparação dos resultados da análise elementar dos lodos estudados com valores encontrados na literatura.

Fonte: \*ANDREOLI, 2001;\*\*SILVA *et al.*, 2003;\*\*\* YU *et al.*, 2002.

Considerando primeiramente o lodo doméstico, observa-se uma concentração de carbono cerca de 120 % superior quando comparada com a obtida por Andreoli (2001). Apesar disto, Ludovice e Fernandes (2001) afirmam que a concentração poderia ser mais alta, visto terem determinado quantidades superiores a 35%. Estas diferenças podem estar relacionadas às características dos locais de cobertura da rede de coleta de esgoto.

O valor encontrado para a concentração de nitrogênio, igual a 4,405 %, é considerado elevado em relação aos padrões encontrados por Andreoli (2001), porém, Malta (2001) ressalta que a concentração de nitrogênio no Brasil varia de 0,5 a 7,6 % nos lodos domésticos gerados a partir de digestão aeróbica.

Com relação ao teor de enxofre, não existe um valor ou faixa padrão na literatura, mas considerando a possibilidade de geração de gases sulfurosos durante a oxidação do lodo, é importante que sua concentração seja a menor possível.

Fazendo-se as mesmas considerações anteriores para o lodo têxtil, verifica-se que os níveis de carbono e nitrogênio se apresentaram cerca de 30 % superiores em relação aos encontrados por Silva *et al* (2003), enquanto que o de enxofre foi menor em torno de 175 %. Essas diferenças também estão diretamente ligadas às características intrínsecas de cada processo de fabricação gerador de lodo. Entretanto, o fato de que na pesquisa realizada por Silva *et al* (2003) o efluente passou por tanques anaeróbicos, enquanto que o lodo têxtil aqui em estudo não, também pode ter influenciado na diferença de concentrações encontradas.

Finalmente, em relação ao lodo de papel e celulose, os resultados obtidos neste trabalho, somente nitrogênio e enxofre apresentaram diferença significativa em relação ao trabalho da literatura considerado, maior do que 100 %. Novamente, pode-se dizer que diferenças entre os processos industriais podem ser a justificativa.

O lodo da empresa de celulose e papel obteve maior de concentração de carbono (44,83 %), hidrogênio (5,35 %) e enxofre (1,76 %) e a menor concentração de nitrogênio (1,77 %) em relação aos outros dois lodos caracterizados. Apesar disso, o teor elevado neste lodo é devido à presença de materiais fibrosos orgânicos, representando entre 40 – 60 % a composição final do lodo (CAMPREGHER, 2005). Porém, como comentam Gottsching e Pakarinen (2000), sua composição pode possuir, em média, 37 % de carga inorgânica e 19 % de carbonato de cálcio, devido ao processo de fabricação do papel, o que também, possivelmente aumentou a quantidade de hidrogênio. Este resultado afirma-se quando comparado ao de Yu *et al*. (2002), que determinaram o valor de 4,53 % de hidrogênio elementar na caracterização do lodo, este que, possui tratamento semelhante ao lodo de celulose e papel.

A concentração de nitrogênio apesar de baixa devido à característica do processo, como também, ao tratamento realizado nas águas residuárias, o qual passa por um circuito de reciclo nas lagoas aeróbicas, oxidando a maior parte de

nitrogênio, ainda é muito alto, pois este resultado se contrapõe ao de Yu *et. al.* (2002), que determinaram o valor de 0,70 %, como também de Caputo e Pelagagge (2001) que cita o valor de 0,32 % como característico para lodos de produção de papel. A diferença entre os resultados pode ser devida à estação de tratamento de efluentes receberem efluente gerado desde a lavagem de toras como também as cinzas geradas na caldeira de força, além do processo da fabricação da massa celulósica, alterando as concentrações da origem do efluente na entrada da estação de tratamento de efluentes.

Apesar das diferenças encontradas, de um modo geral os lodos estudados apresentaram composição elementar em concordância com os valores alcançados pelos trabalhos da literatura utilizados como base de comparação.

#### 4.1.2 Determinação dos teores de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis

A Figura 9 apresenta os resultados da determinação de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis para os três lodos analisados.

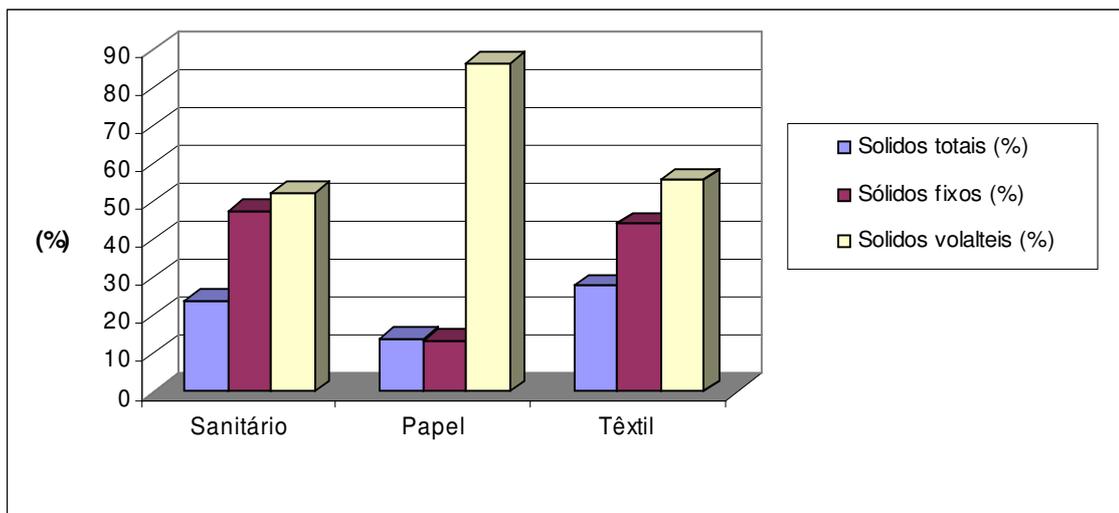


Figura 9: Resultados da determinação de sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis.

Observando-se os valores apresentados na Figura 9, verifica-se que os teores de sólidos totais, fixos e voláteis obtidos para os lodos doméstico e têxtil são semelhantes, enquanto que o percentual gerado do lodo de papel e celulose foi inferior, atingindo aproximadamente 10% em relação aos outros dois lodos.

O teor de sólidos totais encontrado nos três lodos pode ser considerado baixo em relação à totalidade da amostra, e a importância de sua determinação se deve ao fato da influência que a água exerce em processos de combustão, pois, se presente em teores elevados, pode conduzir à necessidade de secagem prévia da biomassa e, conseqüentemente, mais energia para essa operação. Neste sentido, os sistemas de tratamento de efluentes terão que alcançar maior eficiência na etapa de secagem do lodo formado ou deveria existir uma etapa de secagem ao sistema de geração de energia.

Analisando-se agora o teor de sólidos fixos, destaca-se o menor valor obtido com o lodo de papel e celulose, cerca de 30% menor dos outros, indicativo da maior presença de substâncias inorgânicas na composição dos lodos sanitário e têxtil em relação ao primeiro, o que é reforçado pelos teores de sólidos voláteis (teoricamente a carga orgânica das biomassas) apresentados, sendo aproximadamente 35% maior para o lodo de celulose e papel. Considerando-se a utilização como combustível, o lodo de papel e celulose apresentou melhor condição de uso, visto que tenderia à maior eficiência energética e menor geração de resíduos sólidos a serem dispostos posteriormente.

#### 4.1.3 Determinação do Poder Calorífico

A Tabela 11 apresenta os resultados do poder calorífico das amostras de lodo.

Tabela 11: Poder calorífico das biomassas estudadas.

Amostras	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Lodo papel e celulose	19,5 ± 0,7	18,0 ± 0,7
Lodo doméstico	20,1 ± 0,6	18,6 ± 0,6
Lodo Têxtil	17,0 ± 0,4	15,4 ± 0,4

Os valores de poder calorífico superior e inferior dos lodos doméstico e papel e celulose são semelhantes, da ordem de 19 MJ/kg para o superior e 18 MJ/kg para o inferior, enquanto que o lodo têxtil apresentou um menor desempenho em liberação de energia dos três. Porém, ao se comparar com outras biomassas utilizadas na geração de energia, tal como madeira de descarte (PCS = 13 MJ/kg) e bagaço de cana em briquete (PCS = 14,5 MJ/kg) (ARAUTERM, 2008), todos os três apresentaram melhor desempenho.

Os resultados encontrados estão também, em média, dentro da faixa obtida para resíduos industriais genéricos (16,0 MJ/kg), resíduos hospitalares (14,0 MJ/kg) e refugos variados (18,5 MJ/kg), e acima dos valores previstos para lodo seco de efluentes (12,5 – 15,0 MJ/kg), conforme citado por Almeida (2007).

Além disso, é interessante notar que, ao se confrontar os resultados de poder calorífico com os obtidos pela análise elementar, geração de cinzas e de sólidos voláteis totais, não se confirma a primeira impressão de que o lodo de papel e celulose apresentaria um melhor desempenho em relação aos outros dois.

Portanto, os resultados do poder calorífico apresentados pelos lodos aqui estudados são um indicativo de viabilidade de uso como biomassa combustível. Ressalta-se, entretanto, conforme discutido nos dois itens anteriores, a ocorrência de variação na composição dos lodos formados, devido a fatores como a forma de coleta de esgotos domésticos, estações do ano, alterações nos processos fabris e nos sistemas de tratamentos de efluentes, principalmente. Isto sugere a necessidade da ampliação dessas análises para se poder chegar a uma composição padrão dos lodos de modo que o processo de queima seja projetado de modo mais eficiente.

## 4.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO

### 4.2.1 Análise Termogravimétrica (ATG)

Nas figuras 10 e 11 estão apresentadas as curvas de ATG das amostras de lodo sob condições de atmosfera oxidante (combustão) e inerte (pirólise), respectivamente.

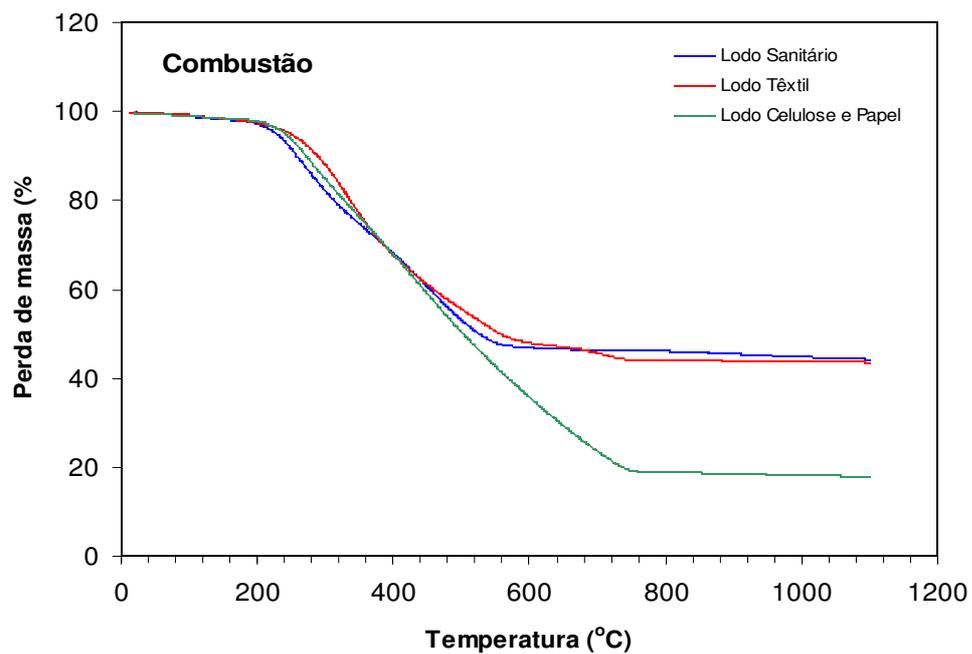


Figura 10: ATG das amostras de lodo doméstico, têxtil e de papel e celulose em atmosfera oxidante (combustão).

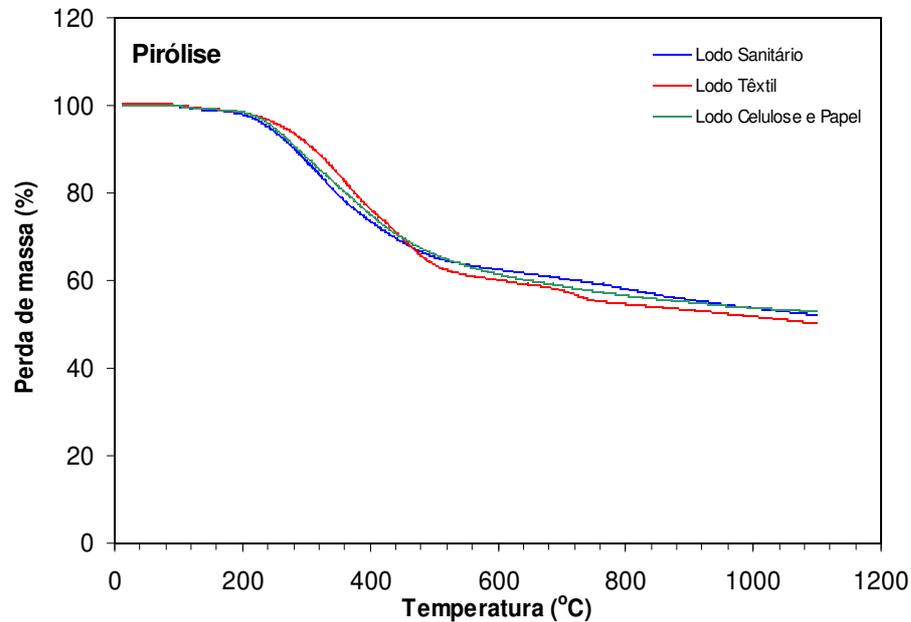


Figura 11: ATG das amostras de lodo doméstico, têxtil e de celulose e papel em atmosfera inerte (pirólise).

Observa-se pelas curvas que o lodo doméstico, em meio oxidante, teve sua primeira perda de massa significativa (24,68 %) nas temperaturas entre 160 e 360 °C, e a segunda e principal perda (26,90 %), entre as temperaturas de 360 e 645 °C. Já em meio inerte, entre 150 e 580 °C ocorreu a primeira e mais significativa decomposição (35,92 %), e a segunda (10,84 %) entre 580 e 1101 °C. As cinzas totalizaram 44 % da massa inicial em via oxidante.

Também no lodo têxtil, em atmosfera oxidante, houve apenas duas perdas de massa significativa, 45,41 % e 5,89 %, na faixa de temperatura de 150 a 530 °C e 530 a 650 °C, respectivamente, resultando 43 % de cinzas, valor semelhante ao sanitário. Em atmosfera inerte, com o lodo têxtil ocorreram quatro estágios significativos, um com perda de 23,95 % na faixa de 160 – 410 °C, outro com 14,88 % a 410 e 590 °C, o terceiro com 1,47 % na faixa de temperatura de 590 a 660 °C e, o último, com perda de 4,10 % na faixa de 790 a 1101 °C. Apesar disso, tanto na combustão quanto na pirólise, o lodo mostrou comportamento semelhante na sua decomposição, refletindo o baixo valor de sólidos voláteis apresentado.

O lodo da indústria de celulose e papel apresentou, na combustão, três estágios de decomposição, o primeiro (15,60 %) ocorreu entre 160 e 340 °C, o segundo (23,52 %) entre 340 e 660 °C e, finalmente o terceiro (6,75 %) ,entre 651,0 e 981,9 °C. Como produto, final resultou em 18 % de cinzas, valor inferior aos dos outros dois lodos, o que pode ser explicado pela maior concentração de carbono no lodo de papel. Essa maior concentração de carbono no lodo de papel em relação aos demais também é observado pelo declínio mais acentuado da curva no momento posterior a 450 °C, provavelmente como uma conseqüência da combustão das cinzas formadas ainda contendo carbono, o que nas outras duas amostras ocorre numa taxa mais lenta. Em atmosfera inerte, o lodo de celulose e papel apresentou apenas dois estágios significativos, o primeiro (160 a 340 °C) com uma perda de material de 20,67 % e o segundo (340 a 790 °C) com 58,83 %. Houve formação de 52,5 % de cinzas, não se observando, assim, a oxidação das cinzas do lodo, resultando em desempenho semelhante aos demais lodos, visto que a celulose se decompõe mais lentamente em atmosfera sem oxigênio.

#### 4.2.2 Análise Termogravimétrica Diferencial (ATD)

Nas figuras 12 e 13 estão apresentadas as curvas de ATD das amostras de lodo sob condições de atmosfera oxidante (combustão) e inerte (pirólise), respectivamente.

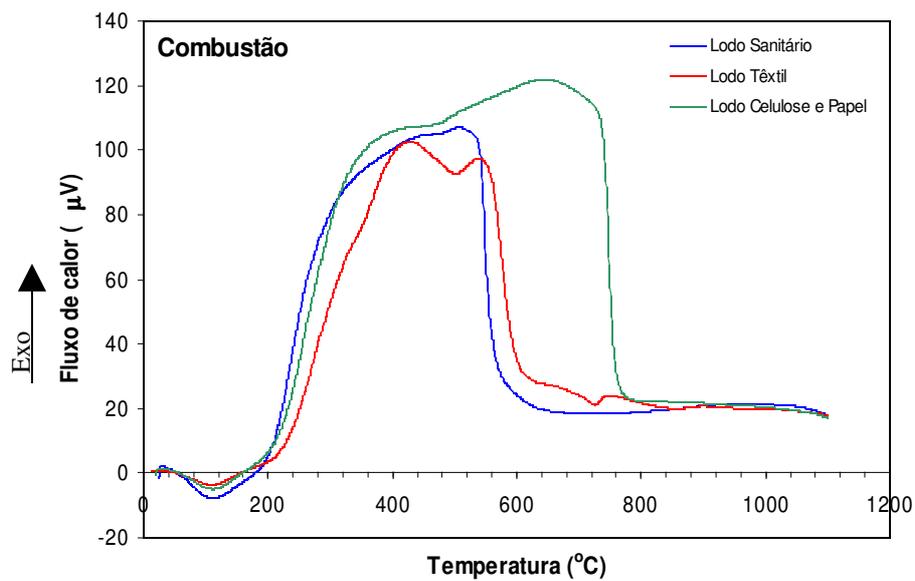


Figura 12: ATD das amostras de lodo doméstico, têxtil e de Celulose e papel em atmosfera oxidante (combustão).

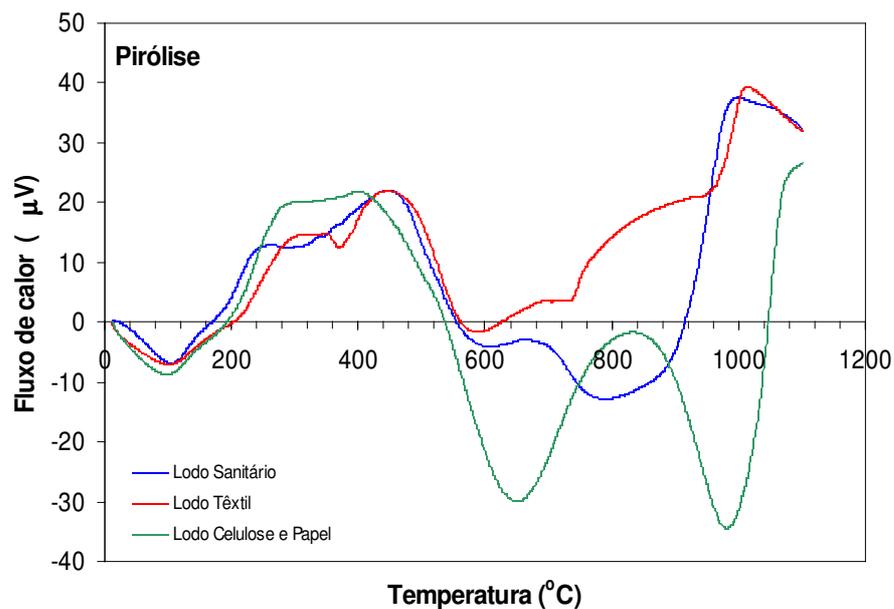


Figura 13: ATD das amostras de lodo doméstico, têxtil e de celulose e papel em atmosfera inerte (pirólise).

Observa-se das curvas de ATD (Figura 12), que as amostras de lodo de efluente doméstico e têxtil apresentam comportamento térmico frente à combustão semelhante na região de 160 a 600 °C, apresentando eventos exotérmicos (em dois estágios), assim como verificado nas curvas de ATG (Figura 10).

A amostra de lodo de celulose e papel apresenta eventos exotérmicos em dois estágios na região de 160 a 790 °C. Como observado na Figura 12, observa-se que abaixo de 150 °C, ocorre um pico endotérmico, para as três amostras, devido a reações de desidratação. Na região de 160 a 600 °C, também verifica-se um comportamento semelhante entre as amostras de lodo, com eventos exotérmicos (liberação de calor) ocorrendo em dois estágios. A partir de 600 °C, a amostra de lodo têxtil apresenta aumento no fluxo de calor até 1000 °C, enquanto que são observados eventos endotérmicos em 650 e 980 °C para a amostra de lodo de celulose e papel e em 600 e 800 °C para a amostra de lodo doméstico. Estes eventos também são visualizados para as amostras de lodo têxtil, porém com menor intensidade. Estes picos endotérmicos são provavelmente resultados da pirólise de materiais inorgânicos presentes na amostra. A partir destes eventos endotérmicos, verifica-se um aumento no fluxo de calor para um máximo em 1000 °C para a amostra de lodo doméstico, semelhante à amostra de lodo têxtil, e em 1100 °C para a amostra de lodo de celulose e papel numa intensidade menor, causada principalmente pelos eventos endotérmicos.

#### 4.2.3 Comparação entre as curvas de ATG e ATD

Dos resultados apresentados pelas curvas de ATG e ATD para as três amostras de lodo, verifica-se um comportamento térmico bastante semelhante em condições de pirólise e combustão em vários dos estágios apresentados, que podem ser explicados segundo alguns autores (Gómez-Rico *et al*, 2005; Font *et al*, 2001; Zhu *et al*, 2007), como segue:

- até temperatura de 160 °C, ocorrem reações de desidratação;
- de 170 a 660 °C, ocorrem três estágios – o primeiro devido, principalmente, à decomposição de uma fração pequena da amostra, ou seja, de material biodegradável com cadeia molecular mais curta e compostos semivoláteis (entre 160 e 350 °C); o segundo devido à decomposição de uma fração maior intermediária, podendo ser referente a polímeros orgânicos presentes provenientes da

estabilização (oxidação bioquímica) do lodo ou polímeros provenientes do lodo gerado no processo de tratamento (entre 350 e 450-500 °C); e o terceiro devido à decomposição de outra fração pequena, de material de difícil biodegradabilidade, como celulose ou similares (entre 500 e 660 °C). Cabe ressaltar, que existe certa dificuldade em identificar exatamente onde os estágios iniciam e terminam.

- acima de 660 °C, ocorre principalmente a oxidação das cinzas e redução de materiais inorgânicos.

Ainda, comparando-se os resultados apresentados pelas curvas de ATG (Figuras 10 e 11), observa-se um afastamento (decréscimo) entre as curvas de pirólise e combustão para temperaturas acima de 200 °C, para todas as amostras. Segundo Gómez-Rico *et al* (2005), este comportamento pode ser explicado pelo fato do processo de combustão ser considerado como uma pirólise oxidativa, em que não existe formação de cinza ou a cinza formada é oxidada simultaneamente à sua formação, resultando numa contribuição na liberação de energia. Isto ocorre principalmente em lodos provenientes de processos aeróbicos de estabilização, como os analisados neste trabalho. O decaimento entre as curvas é mais acentuado para a amostra de lodo de celulose e papel, provavelmente porque, neste caso, a oxidação ocorre numa taxa mais lenta que nas outras amostras.

Com relação ao teor de cinzas, existe uma diferença muito clara entre o lodo de celulose e papel em relação aos outros dois. Enquanto o primeiro gerou apenas 18 % de cinzas, resultado coerente com os 13,56 % obtidos anteriormente na análise do teor de cinzas (item 4.1.2) e os 14,31 % de Yu *et al.* (2002). Já os teores de cinzas para os lodos doméstico e o têxtil foram superiores a 35%, semelhantes aos resultados obtidos anteriormente (item 4.1.2) e considerados normais por Folgueras (2003) e Gómez-Rico (2005).

### 4.3 ANÁLISE DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Na Tabela 12 são apresentadas as emissões gasosas geradas pela queima dos três lodos estudados, sob condições estacionárias.

Tabela 12: Emissões gasosas da queima dos lodos doméstico e industrial.

Amostras	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)
Doméstico	17,33	192	216,67	13	13	ND
Têxtil	15,56	192	216	8	8	ND
Papel	14,67	200	211,11	7	7	ND

ND = não detectado

Analisando-se os dados mostrados na Tabela 12, verifica-se novamente que a diferença de valores em todos os parâmetros medidos pode ser considerada desprezível, ou seja, comportamentos semelhantes das três amostras quanto à reação de combustão.

Avaliando-se separadamente as quantidades emitidas de cada gás, observa-se que a alta concentração de monóxido de carbono em relação à de dióxido de carbono demonstra que a combustão foi incompleta, resultado esperado visto não ter sido possível realizar o controle das condições operacionais do sistema. Além disso, pode ter havido influência negativa da carga inorgânica contida nas amostras e, outro ponto relevante a ser considerado, é que as amostras estavam em recipiente do tipo cadinho de fôrma alta, dificultando um maior contato do oxigênio com o material de queima. Em escala industrial, a queima é realizada, normalmente, em leitos fluidizados, o que permite maior homogeneidade da amostra com a atmosfera.

Com relação aos gases NO, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, a baixa concentração para os três lodos, sendo zero para o SO<sub>2</sub>, comparando-se com CO<sub>2</sub> e CO, reflete a menor concentração dos elementos nitrogênio e enxofre na composição das amostras. Ressalta-se ainda, que o nitrogênio atmosférico não interferiu na análise, pois a temperatura da mufla não ultrapassou 900 °C, temperatura baixa para fazê-lo reagir.

Uma análise comparativa desses resultados com os padrões de emissão para CO e NO<sub>2</sub> gerados por processos de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar, segundo a Resolução CONAMA Nº 382/2006, mostra que é possível apenas supor que as emissões, geradas na queima de 20 g das três amostras de lodo, de CO e de NO<sub>2</sub> ultrapassaram os limites estabelecidos pela resolução, de 101,3 ppm e 0,3 ppm, respectivamente. No entanto, devido à necessidade de maior controle das condições operacionais da combustão conduzida neste estudo, estes resultados servem apenas como um indicativo qualitativo preliminar das emissões geradas.

Desta forma, sugere-se, na continuidade desse trabalho, maior ênfase à infraestrutura necessária para condução da combustão com controle das principais condições operacionais, além da inclusão da medição de material particulado e vapor d'água nos gases gerados.

A partir desse conhecimento será possível afirmar se haverá a necessidade de se implantar um sistema de controle de efluente gasoso, dado fundamental para se determinar a viabilidade econômica do uso desse tipo de resíduo como combustível.

## CONCLUSÃO

Os resultados da análise elementar das amostras dos três lodos distintos mostraram que quanto ao teor de carbono, o lodo proveniente da indústria de papel e celulose apresentou valor maior comparativamente ao apresentado pelos lodos doméstico e têxtil, sugerindo que o primeiro apresentasse um melhor desempenho quanto ao uso como combustível em relação aos demais, análise reforçada também pelo baixo teor de cinzas resultante do lodo de papel e celulose comparado com os outros dois lodos.

Dos resultados de poder calorífico e comportamento térmico, verificou-se que, de um modo geral, os três lodos mostraram resultados semelhantes, com valores de poder calorífico em torno de 19 MJ/kg, similar aos de outros tipos de resíduos, como por exemplo, resíduos industriais genéricos, e até superior aos valores encontrados na literatura para lodo desidratado de efluentes.

O comportamento térmico das amostras apresentou semelhança frente a condições de combustão e pirólise para temperaturas de até aproximadamente 600 °C, em que ocorre decomposição da maior fração do material orgânico e de fácil degradação e há significativa liberação de energia. A amostra de lodo de efluente de celulose e papel apresentou maior estabilidade térmica sob atmosfera oxidante que os demais, principalmente pela presença em quantidade considerável de materiais de difícil degradação, como a celulose. Sob condições de combustão, as amostras apresentaram menor porcentagem de cinzas do que sob pirólise, em temperatura acima de 800 °C, principalmente a amostra de lodo de celulose e papel. Acima de 660 °C, em condições de pirólise, ocorrem vários eventos endotérmicos, devido principalmente à oxidação das cinzas formadas no processo.

Esses resultados indicam uma viabilidade de uso dos três tipos de lodo como biomassa combustível, mas que em função da ocorrência de variação na composição dos lodos formados, devido a fatores como a forma de coleta de

esgotos domésticos, estações do ano, alterações nos processos fabris e nos sistemas de tratamentos de efluentes, principalmente, há a necessidade de ampliação dessas análises para se poder chegar a uma composição padrão dos lodos, de modo que o processo de queima seja projetado eficientemente.

Considerando a baixa concentração dos elementos nitrogênio e enxofre, apresentada pelos três materiais analisados, sendo que o enxofre só foi determinado no lodo de papel e celulose, previa-se que as emissões gasosas geradas apresentariam baixo teor dos poluentes  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ , fato confirmado pelos resultados alcançados com a queima desses lodos. Já em relação ao  $\text{CO}$ , este apresentou tendência de extrapolar os limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 382/2006, que regulamenta esse assunto. Contudo, devido à dificuldade de controle das condições operacionais, sugere-se a continuidade dos trabalhos com maior ênfase à infra-estrutura necessária para condução da combustão com controle das principais condições operacionais, além da inclusão da medição de material particulado e vapor d'água nos gases gerados.

Finalmente, uma análise integrada de todos os resultados alcançados no presente trabalho, permite afirmar a importância de se continuar com esse estudo ao se verificar a redução do volume de resíduos a serem descartados em aterros industriais, diminuição da exploração dos recursos naturais, reciclagem de resíduos dentro e fora da planta fabril de origem, atendendo aos conceitos de produção mais limpa e, principalmente, considerando o contexto mundial atual, à urgência na obtenção de fontes renováveis e menos poluentes de energia.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre este assunto, sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar a viabilidade econômica da utilização de lodos de estação de tratamento de efluentes como biomassa;
- Ampliação dos estudos para melhoria da eficiência energética;
- Avaliação de outros lodos para utilização como biomassa combustível;
- Estudo da utilização das cinzas geradas após a combustão como material para construção civil;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAD, J.M.T. Controle Químico de Qualidade. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- ALMEIDA, I. A. Demandas tecnológicas em meio ambiente e de empresas de saneamento. Inovatec 2007, São Paulo, 2007
- AMBIENTE BRASIL. Biomassas: disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br>, acesso em 29/09/2005.
- ANDREOLI, C.V., BONNET, B.R.P., LARA, A.I., WOLTER, F.R., “Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado do Paraná”, In.: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, pp. 232-244, Foz do Iguaçu, 1997.
- ANDREOLI, C.V.; GARBOSSA, L.H.P.; LUPATINI, G; PEGORINI, E.S.; BILOTTA, P. Gerenciamento do lodo de estação de tratamento de esgoto no Brasil. Belo Horizonte, UFMG, 2001.
- ANEEL. ATLAS: disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf), acesso em 14/10/06.
- ASIA, I. O; OLADOJA, N. A; BAMUZA-PEMU, E. E. Treatment of textile sludge using anaerobic technology. American Journal of Biotechnology, v. 5, p. 1678-1683, set. 2006.
- ARAUJO, A.S.F; MONTEIRO, R.T.R; CARDOSO, P.F. Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.40, n.6, p.549-554, jun. 2005.
- ARAUTERM. Tabelas Técnicas. < Disponível em [http://www.arauterm.com.br/tabelas\\_combustiveis.html](http://www.arauterm.com.br/tabelas_combustiveis.html)>, acesso em abril/2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos classificações. NBR 10004 segunda edição. 2000.

- BALAN, D.S.L.; MONTEIRO, R.T.R. Decolorization of textile indigo dye by lignolytic fungi. *Journal of Biotechnology*, v.89, p.141-145, 2001.
- BARCELLOS, I.O. Lodo têxtil: um problema ou uma solução. *Química Têxtil*, v.69, p.16-23, 2002.
- BIDONE, F.R.A. Metodologia e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABES (Associação de Engenharia Sanitária e Ambiental). 1999.
- BOROWSKI, H. C., SILVEIRA, J. L., EBINUMA, C. D., FERREIRA, E. D. Análise de um modelo de co-geração a partir de resíduos sólidos urbanos. *Revista de Tecnologia*, Fortaleza, v. 23, n. 1, p. 26-27, dez. 2002.
- BOTÃO, S. G., LACAVA, P. M. Uso do bagaço da cana-de-açúcar para co-geração de energia elétrica no Estado de São Paulo e a comercialização do excedente da energia gerada. *Revista de Biociências*, Taubaté, v. 9, p. 17-37, jul-set. 2003.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo: CETESB, 1993.
- 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.
- CAMPREGHER, N. Estudo da viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. Waste-to-energy plant for paper industry sludges disposal: technical-economic study. *Journal of Hazardous Materials*, v. 81 p. 265–283, 2001.
- CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q.. *Princípios de Combustão Aplicada*. Florianópolis: UFSC, 2007.
- CHAGAS, W. F. Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da penha no estado do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz / Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.
- CHAGGER, H. K.; KENDALL, A.; MCDONALD, A.; POURKASHANIAN, M. WILLIAMS, A. Formation of dioxins and other semi-volatile organic compounds in biomass combustion. *Applied Energy*, 60, p. 101-114, 1998.

- CETESB. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo -2001. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental: São Paulo, 2002.
- CHIN-TSON LIAW; HUI-LAN CHANG; WEN-CHING HSU; CHI-RU HUANG, A novel method to reuse paper sludge and generation ashes from paper mill. *Journal of Hazardous Materials*, V. 58, p.93-102, 1998.
- COLANZI, J.; PIETROBON, C. L. R.; Caracterização Físico-Química e Térmica de lodo gerado no processo de tratamento de efluentes de lavanderia textil. XI Encontro Anual de Iniciação Científica - Universidade Estadual de Maringá: Maringá, 2002.
- COMPANHIA PERNANBUCANA DO MEIO AMBIENTE – CPRH. Manual de procedimentos: Amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias. Recife: CPRH, 1999.
- COMPANHIA PERNANBUCANA DO MEIO AMBIENTE – CPRH. Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização para a tipologia têxtil, CPRH, 2001.
- CONAMA (1989), Resolução CONAMA nº 05, Dispõe sobre o Programa Nacional da Poluição do Ar – PRONAR – Data da Legislação: 15/06/89 – Publicação DOU: 25/08/89.
- CONAMA (1990a), Resolução CONAMA nº 03, Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no – PRONAR – Data da Legislação: 28/06/90 – Publicação DOU: 22/08/90.
- CONAMA (1990b), Resolução CONAMA nº 08, Dispõe sobre padrões de emissão para instalação de novas fontes de combustão externa do ar, previstos no – PRONAR – Data da Legislação: 28/06/90 – Publicação DOU: 22/08/90.
- CONAMA (2006), Resolução CONAMA nº 382, Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. – Publicação DOU: 26/12/2006.
- CORSON, W.H. Manual Global de Ecologia. Augustus ed., 1993.
- COSTA, V. R. Plásticos a caminho da reciclagem. *Ciência Hoje*. Rio de Janeiro, v. 18, n. 107, p. 8-15, mar. 1995.
- COUTO, L. C., COUTO, L., WATZLAWICK, L. F., CÂMARA, D. Vias de valorização de biomassa. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.
- CRUZ, A.A.F. Estudo sobre a utilização do resíduo da queima da biomassa em argamassa. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2000.

- DAVIS, M. L. CORNWELL, D. A. Introduction to Environment Engineering. New York: Mac-Hill, 1991.
- 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, fev. 2005.
- EUROPE COMISSION. Is Sewage Sludge a Fuel or a Waste?: disponível em [http://ec.europa.eu/environment/integration/research\\_alert\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/integration/research_alert_en.htm), acesso em 10/10/2006.
- FATMA, Decreto de lei nº14.250, Regulamenta dispositivos da Lei nº 5.793, de 15 de outubro de 1980, referentes à Proteção e a Melhoria da Qualidade Ambiental – Publicação em 05/06/1981.
- FOLGUERAS, M. B.; DIAZ, R. M.; XIBERTA, J.; PRIETO, I. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge. Fuel. V. 82 P. 2051–2055, 2003
- FONT, R.; FULLANA, A.; CONESA, J. A.; LLAVADOR, F. Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. V. 58–59, P. 927–941, 2001.
- 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. Dissertação de Msc. UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- FORMOSINHO et al. Parecer Relativo ao Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos. 2000. Disponível em <<http://paginas.fe.up.pt/~jotace/cci/Relatorio/Rcom.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2006.
- GEYER, A.L.B., Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- GÓMEZ-RICO, M. F.; FONT, R.; FULLANA A.; MARTÍN-GULLÓN, I. Thermogravimetric study of different sewage sludges and their relationship with the nitrogen content. J. Anal. Appl. Pyrolysis, v. 74, p. 421–428, 2005.
- GONÇALVES, J.P., Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos, Tese de M.Sc., UFRG, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.
- GÖTTSCHING L.; PAKARINEN H., Recycled fiber and deinking, editora TAPPI, livro 7o, 2000.

- HILSDORF, J. W.; BARROS, N. D.; TASSINARI, C. A.; COSTA, I. Química Tecnológica. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 3ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- JOURNAL OF THE INSTITUTION OF WATER ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. Sewage Sludge Disposal. v.3, p.208-211, 1989.
- KHANBILVARDI, R., AFSHARI, S., "Sludge Ash as Fine Aggregate for Concrete Mix", *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 9 (Sep), pp. 633-638, 1995.
- KNUTH, K. R. Gestão Ambiental: Um estudo de caso para o setor têxtil – S.C. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2001.
- LIMA G.; BATISTA A.; MALHERIROS R.; LUCENA J. C.; CUNHA A.; PORTELA C.; ALVES R., Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização Indústria de Papel e Celulose, Publicações Projeto CPRH, Recife 1998.
- LUDUVICE, M; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte de lodo. In: VON SPERLING, M; ANDREOLLI, C. V.; FERNANDES, F. Lodos de esgotos: tratamento de disposição final. DESA – UFMG: Belo Horizonte, 2001.
- MALTA, T. S. Aplicação de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos na agricultura: Estudo do caso do Município de Rio das Ostras –RJ. Dissertação (Mestrado), Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 2001.
- MANUAL DE PROCEDIMENTOS: Amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias. CPRH: Recife, 1999
- MARTINELLI, U.A.; PERON, A.P.; MARTINS, E.P.; SCHARF, M.; BUDAG, N.; MENEZES R. R.; NEVES G. A.; FERREIRA H. C., O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v6, n2, p.303-313, 2002.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V.P. O uso agrícola do bio sólido e a suas propriedades do solo. In: Bio sólido na agricultura. Cap. 12. Sabesp, Escola Politécnica – USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.
- MENDES, M; NEVES, E.; ROCHA, J.; RIELLA, H.; Uso de resíduos para obtenção de agregados leves para construção civil. VII Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Florianópolis, 1998.
- MESA, J.M.; ROCHA, J.D.; OLIVARES, E.; BARBOZA L.A.; BROSSARD L.E.;

- NASCIMENTO, C. W. A. et al. Alterações Químicas de Solos e Crescimento de Milho e Feijoeiro Após Aplicação de Lodo de Esgoto. R. Bras. Ci. Solo, v. 8, p. 385-392, 2004.
- NIR, M. M. MILTZ, J. RAM, A. Update in plastics and the environment: progress and trends. Plastic Engineering, v. 49, n.3, p. 197-209, mar. 1993.
- OLIVEIRA, J.L.F. Poluição Atmosférica e o Transporte Rodoviário: Perspectivas de Uso do Gás Natural na Frota de Ônibus Urbanos da Cidade do Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1997.
- ORAL, J.; SIKULA, J.; PUCHYR, R.; HAJNY, Z.; STEHLIK, P.; BEBAR, L. Processing of waste from pulp and paper plant. Journal of Cleaner Production, v. 13, 509 – 515, 2005.
- PATUSCO, J. A. M. Biomassa e geração elétrica: disponível em <http://ecen.com/content/eee5/biomas.htm>, acesso em 16/08/2006.
- PHILIPPI JR, A. Saneamento, saúde e Ambiente. São Paulo: Manole, 2005.
- PRIM, E. C. C. Reaproveitamento de Lodo Têxtil e da Cinza Pesada na Construção Civil: Aspectos Tecnológicos e Ambientais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 107p., 1998.
- SAMAE. – Serviço Autônomo Municipal de Águas e Esgotos do Município de São Bento do Sul. Disponível em <<http://www.samaesbs.sc.gov.br.br/>> Acesso em: 11 out. 2007.
- SILVA, E.P; MOTA, S; AQUINO, B.F. Potencial de utilização do lodo de esgoto de indústria têxtil como fertilizante agrícola. Engenharia Sanitária e ambiental, v.8, p 69-76, 2003.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION WATER AND WASTEWATER, 20 th edicion, 2000.
- RYU, C.; PHAN, A.N.; SHARIFA, V. N.; SWITHEBANK, J. Combustion of textile residues in a packed bed. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 31 p. 887–895, 2007.
- van VOORNEBURG, F.; van VEEN, H. J. Treatment and disposal of municipal sludge in the Netherlands. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, v.7, p.117-121, 1993.

VLASSOV, D. Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão. Curitiba: Editora UFPR, 2001.

VON SPEARLING, M. Lodos Ativados. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

YU, Y. H.; KIM S.D.; LEE J. M.; LEE K. H.. Kinetic studies of dehydration, pyrolysis and combustion of paper sludge. *Energy*, v. 27, p. 457 – 469, 2002.

ZHU, Y.; CHAI, X.; LI, H.; ZHAO, Y. Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill. *Thermochimica Acta*. doi:10.1016/j.tca.2007.07.003.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, p. 55-116, 1996.