

**MARIANA HARUMI IMAI**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE  
ETEI DE INDÚSTRIA DE PAPEL NO MUNICÍPIO DE  
CORREIA PINTO/SC.**

**FLORIANÓPOLIS - SC**

**2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

**MARIANA HARUMI IMAI**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE ETEI DE  
INDÚSTRIA DE PAPEL NO MUNICÍPIO DE CORREIA  
PINTO/SC.**

Trabalho submetido à Banca Examinadora  
como parte dos requisitos para Conclusão do  
Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental –  
TCC II

Orientador: Prof. Dr. Fernando Soares Pinto  
Sant'Anna

**FLORIANÓPOLIS - SC**

**2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE ETEI DE  
INDÚSTRIA DE PAPEL NO MUNICÍPIO DE CORREIA  
PINTO/SC.**

**MARIANA HARUMI IMAI**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como  
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental-  
TCC II

**BANCA EXAMINADORA :**



Prof. Dr. Fernando S. Pinto Sant'Anna  
(Orientador)



Prof. Dr. Amando B. de Castilho Jr  
(Membro da Banca)



Elivete Carmem Clemente Prim  
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)**

**2010**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Fernando, pela paciência e dedicação de orientar mesmo a distância.

Aos meus amigos e namorado, pela compreensão da ausência nos encontros, churrascos, festas e viagens nos últimos meses e pelo apoio nos momentos de difíceis.

E em especial aos meus pais, pelo apoio e amor incondicionais, pois mesmo à distância sempre estiveram sempre presentes para ouvir, consolar nos momentos difíceis e vibrar com as conquistas ao longo destes anos.

## RESUMO

O passivo ambiental gerado, o alto custo de transporte e destinação e o direcionamento dos novos modelos de gestão sustentável são fatores que descaracterizam o uso de aterro como a melhor alternativa para a disposição de grandes quantidades de resíduos gerados nas indústrias. Face a este cenário, as indústrias tem investido cada vez mais na minimização da geração de resíduos e no aproveitamento dos resíduos gerados como sub-produtos e como fonte de energia. A indústria de papel *tissue* em estudo fabrica papel para fins sanitários a partir de celulose e de fibra reciclada, esta última produzida na própria planta a partir de aparas de papel fornecidas por cooperativas de triagem de resíduos. Neste estudo foi analisada a viabilidade do uso do lodo de ETE como combustível para a caldeira de grelhas rotativas. Nos testes não foram identificados prejuízos à eficiência de geração de vapor com a inclusão do lodo em até 15,9% na composição de biomassa. Os efluentes gasosos desta queima atendem as legislações pertinentes e a análise econômica dos testes indicou que a queima de lodo pode representar uma economia para a empresa de até R\$ 20.000,00 por mês.

**PALAVRAS-CHAVE:.** Indústria de papel, Lodo, Minimização de Resíduos e Aproveitamento Energético.

## **ABSTRACT**

The environmental liabilities generated, the high cost of transportation and disposal and targeting of new models of sustainable management are factors that mischaracterize the use of landfill as the best alternative for disposing large quantities of mill's waste. Against this backdrop, industries have increased investment in minimizing waste generation and waste recovery as by-products and as an energy source. The tissue mill in question manufactures sanitary paper from pulp and recycled fiber, the latter produced in the plant itself from scrap paper provided by cooperatives of waste. In this study we analyzed the feasibility of using sludge as fuel for ETE boiler rotary grates. In the tests it have not been identified damage to the efficiency of steam generation with the inclusion of sludge in up to 15,9% in the composition of biomass. The gaseous emissions of combustion meet the relevant legislation and the economic analysis of the tests indicated that energetic profit of sludge can represent savings to the company of up to R\$ 20.000,00 per month.

**KEY WORDS:.** Paper Mill, Sludge, Minimization of Waste and Energy Use.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1	Objetivo Geral .....	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
3.1	<b>Indústria de Papel <i>Tissue</i> e Reciclagem de Papel .....</b>	<b>11</b>
3.1.1	<i>Processo Produtivo de Papel Tissue .....</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>Processo de Reciclagem de Papel.....</i>	<i>12</i>
3.2	<b>Tratamento de efluentes de Indústria de papel.....</b>	<b>13</b>
3.2.1	<i>Remoção de umidade do lodo.....</i>	<i>14</i>
3.3	<b>Geração e gerenciamento de RS em indústrias de papel... </b>	<b>15</b>
3.3.1	<i>Disposição de resíduos industriais.....</i>	<i>16</i>
3.4	<b>Aproveitamento Energético do Lodo .....</b>	<b>16</b>
3.4.1	<i>Biomassa.....</i>	<i>17</i>
3.4.2	<i>Poder calorífico.....</i>	<i>18</i>
3.4.3	<i>Queima de lodo em caldeira.....</i>	<i>18</i>
3.5	<b>Legislação .....</b>	<b>20</b>
3.5.1	<i>Resíduos Sólidos.....</i>	<i>20</i>
3.5.2	<i>Emissões Atmosféricas .....</i>	<i>21</i>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
4.1	<b>Situação Física .....</b>	<b>22</b>
4.2	<b>Dados da caldeira .....</b>	<b>22</b>
4.3	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
5.1	<b>Caracterização do Lodo .....</b>	<b>25</b>
5.2	<b>Avaliação do Poder Calorífico.....</b>	<b>26</b>

<b>5.3</b>	<b>Análise do Efluente Atmosférico .....</b>	<b>27</b>
<b>5.4</b>	<b>Teste de Queima em Caldeira.....</b>	<b>28</b>
<b>5.5</b>	<b>Avaliação da Viabilidade Econômica.....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>34</b>



# 1 INTRODUÇÃO

Os resíduos industriais e urbanos vêm se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade moderna enfrenta. Sua disposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente e a contaminação dos mananciais de água e do solo.

As características dos resíduos industriais variam de acordo com o tipo de produto fabricado, a matéria-prima e os insumos utilizados, o processo empregado, as tecnologias usadas nas diversas etapas da produção e o controle da eficiência ambiental. Estes resíduos requerem cuidados especiais quanto à coleta, triagem, acondicionamento, transporte e destinação de acordo com a sua periculosidade a saúde humana e ao meio.

O projeto de lei que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos no país foi aprovado no Senado e aguarda sanção do presidente da república. Entretanto a legislação brasileira já prevê que o gerador mantém responsabilidade solidária e imprescritível sobre seus resíduos, mesmo que os tenha destinado através de empresa regularmente licenciada. Assim, a segurança de uma correta destinação para seus resíduos é hoje, mais do que uma boa prática, uma responsabilidade que nenhuma empresa ou organização pode negligenciar (ABETRE, 2010).

Paralelamente, segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel, o Brasil é o 11º maior produtor de papel e o setor apresenta crescimento anual médio de 5,7% nas últimas décadas. O setor de reciclagem de papel tem evoluído na mesma proporção para suprir a demanda de matéria-prima nas indústrias. Este crescimento acelerado reflete em maior demanda de insumos e matéria-prima e maior geração de resíduos, e também na busca por novos processos, tecnologias e materiais.

A indústria de papel gera impactos ambientais significativos, sobretudo em termos de exploração de recursos naturais, consumo de água, emissões atmosféricas e geração de resíduos.

Embora alguns dos resíduos gerados sejam facilmente reaproveitados nas próprias indústrias de origem ou em empresas recicladoras, como é o caso de plásticos, papéis, metais e madeira, há também aqueles resíduos cuja destinação é mais difícil devido a sua natureza. Neste último caso se enquadra o lodo proveniente do sistema de tratamento de efluentes.

As características desse lodo variam dependendo do tipo de papel produzido, tratamento químico empregado, bem como o tipo de

processo. Lodos de papel produzidos a partir de celulose branqueada são compostos quase que exclusivamente de fibras de celulose, enquanto que o lodo proveniente da reciclagem de aparas de papel contém uma boa parte de cinzas e componentes inorgânicos, além da parcela de celulose. No caso em questão, o lodo da estação de tratamento de efluentes industriais resulta dos dois processos: fabricação a partir de celulose virgem e reciclagem de papel.

A destinação mais comum para este lodo são os aterros industriais. No entanto, essa alternativa não se mostra a melhor opção dos pontos de vista técnico, financeiro e ambiental. Do ponto de vista da sustentabilidade, o ideal é que esses resíduos possam ser reaproveitados, evitando o passivo ambiental gerado e preservando recursos naturais.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial de aproveitamento energético do lodo gerado na ETEI de uma indústria que produz papel *tissue* a partir de aparas recicladas e de fibra celulósica branqueada, através da inclusão deste resíduo na mistura de biomassa, utilizada como combustível em caldeira de grelhas rotativas.

A finalidade do estudo é promover uma utilização mais nobre, do ponto de vista de sustentabilidade, do resíduo gerado na planta, levando em consideração a viabilidade ambiental, técnica e financeira do aproveitamento energético do lodo. Embora a disposição de resíduos em aterro industrial, utilizada atualmente, seja considerada uma técnica de disposição adequada, a mesma gera impactos ambientais, demanda espaço e representa alto custo para a empresa. Além disso, o aproveitamento do resíduo na planta em que foi gerado representa a diminuição do consumo de biomassa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo do trabalho é avaliar o uso de lodo gerado em estação de tratamento de efluentes de indústria de papel *tissue* na composição da biomassa utilizada para queima em caldeira de grelhas rotativas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a eficiência da caldeira nos testes de inclusão de lodo na biomassa;
- Analisar as emissões atmosféricas resultantes da queima de biomassa com adição de lodo;
- Avaliar a viabilidade econômica da inclusão de lodo na biomassa, mediante comparação dos custos para queima X transporte e disposição em aterro.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Indústria de Papel *Tissue* e Reciclagem de Papel

Papel *tissue* ou para fins sanitários são tipos de papéis que abrangem os higiênicos, as toalhas absorventes, guardanapos e lenços, e a linha institucional, para atendimentos a grandes consumidores, como redes de fast food, hospitais, escritórios, indústrias, etc (MACEDO, 2006).

#### 3.1.1 *Processo Produtivo de Papel Tissue*

A maior parte da composição do papel é constituída de celulose, que é a matéria-prima mais importante no processo. Além desta, também são utilizadas inúmeras matérias-primas não fibrosas, dependendo do tipo e da utilização do papel (PIOTTO, 2003).

No caso do papel *tissue*, a celulose utilizada é composta de fibra curta e os demais componentes para a massa são as cargas, os produtos químicos e demais aditivos dependendo das características que se procura e também para melhorar a eficiência e estabilidade no processo.

O Processo de fabricação do papel é constituído basicamente de duas etapas principais: o preparo de massa e a formação da folha na máquina.

- Preparo de massa

A preparação da massa envolve quatro etapas: desagregação da celulose, refinação, preparação da receita e depuração.

Na primeira etapa a celulose em folhas é desagregada em um equipamento chamado hidrapulper, que nada mais é do que um liquidificador doméstico de proporções gigantescas.

A seguir, na fase de refinação as fibras de celulose são submetidas a uma reação de corte, esmagamento ou fibrilação, que causam um aumento da superfície da fibra em contato com o meio, que é a água. Sendo a celulose um material higroscópico, ela retém água em sua superfície, por isso, quanto maior o grau de refinação, mais água pode ser retida.

Neste momento, a pasta celulósica entra no tanque de preparo de receita, onde é misturada com os demais componentes (cargas, produtos químicos e aditivos), que fazem parte da receita do papel.

Por fim, na última etapa de preparo da massa ocorre a operação de limpeza da receita, cuja finalidade é retirar impurezas, bolos de massa ou fibras enroladas que são indesejáveis para a aparência e finalidade da folha de papel.

- **Máquina de papel**

A máquina de papel, para melhor entendimento, pode ser dividida em 05 partes: caixa de entrada, mesa plana, prensas, secador, calandra e enroladeira (PIOTTO, 2003).

Após o preparo, a massa é encaminhada para a caixa de entrada, que é um compartimento que tem a função de distribuir a suspensão de fibras sobre a mesa plana o mais uniformemente possível.

Ao cair sobre a tela, a massa fica retida na superfície, e a água contida nesta passa através da mesma, escoando em calhas apropriadas. Esta água, rica em partículas de fibras e cargas, é recirculada para diluir a massa que alimenta a máquina.

Ao sair da mesa plana, a folha já está formada, porém 80 a 85 % da sua constituição é água. A finalidade das prensas é retirar parte dessa água. Ao sair das prensas para a fase seguinte do processo (secagem), a folha de papel ainda contém cerca de 60% de água

Na etapa final de formação de papel tissue, a secagem ocorre no cilindro denominado Yankee, que é um cilindro de aço com superfície polida. Contra o secador Yankee trabalha um rolo de sucção e, às vezes, uma prensa para pressionar a folha de papel uniformemente sobre a camisa do cilindro. Sobre o secador soma-se uma capota que insufla ar quente sobre a superfície da folha, utilizando o processo de convecção para a secagem (HARDT, 2008).

Para condução da folha, entre os cilindros secadores, usam-se feltros ou telas secadoras. A água evaporada do papel é extraída por coifas especiais. A umidade da folha, ao deixar a seção de secagem, varia de 3 a 8 %.

A calandra é usada para o acerto da espessura e aspereza do papel, ainda na máquina de papel, enquanto que na enroladeira a folha contínua de papel vai sendo bobinada até um determinado diâmetro, daí partindo para os vários processos de beneficiamento e conversão.

### ***3.1.2 Processo de Reciclagem de Papel***

Hoje, o uso de fibras recicladas ao redor do mundo é crescente não só devido à pressões ecológicas e ambientais, mas também em razão

de fatores econômicos e do desenvolvimento tecnológico do setor (O PAPEL, 2005).

A matéria-prima deste processo são as aparas de papel, originadas como refugo em processos industriais ou materiais descartados após utilização.

Nas unidades de reciclagem, o processo produtivo se inicia na desagregação da aparas, realizada de forma similar à celulose, em equipamento denominado hidrapulper, que tem a forma de um tanque cilíndrico e possui um rotor giratório ao fundo. O equipamento desagrega o papel, na presença de água, formando uma pasta (ESCANDOLHERO, 2000).

Já nesta primeira etapa se inicia a depuração da massa por uma peneira localizada abaixo do rotor que segrega impurezas mais grosseiras como fibras não desagregadas, pedras, metal e plásticos.

Após a desagregação, a massa passa pelo processo de depuração, que consiste em remover impurezas mais finas da massa, tais como areia, plásticos, palitos, finos e pastilhas de papel que não se individualizam na desagregação (GALLON, 2006). O princípio utilizado para separar as impurezas nestes equipamentos é a diferença de densidade.

Na sequência, a massa passa por refinadores e através do atrito entre as fibras, a superfície de contato dessas aumenta, melhorando a ligação entre elas e a ação dos químicos utilizados na etapa a seguir.

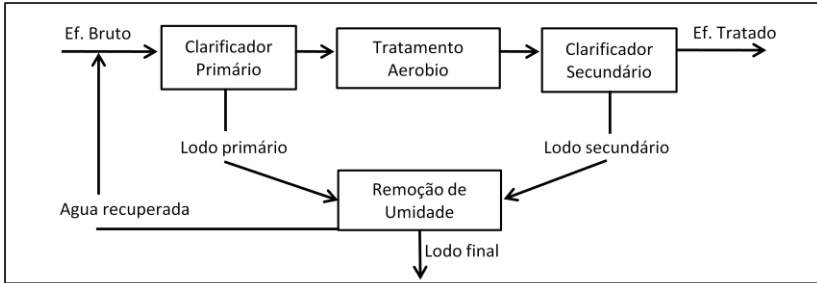
Em virtude das tintas presentes nas aparas, é necessário o branqueamento químico da pasta, utilizando compostos de cloro ou, no branqueamento totalmente livre de cloro, oxigênio, peróxido de hidrogênio ou ozônio.

### **3.2 Tratamento de efluentes de Indústria de papel**

Os processos de tratamento aeróbios são os mais empregados para efluentes industriais. As águas residuárias provenientes de indústrias de papel e celulose são comumente tratadas por processos aeróbios, tais como lagoas aeradas e lodos ativados.

O tratamento biológico é precedido por tratamento primário que visa a remoção de fibras e materiais em suspensão presentes na água residuária. Em alguns casos, também são necessários sistemas de neutralização/equalização e resfriamento da água residuária antes do tratamento biológico (PIOTTO, 2003).

Após a etapa biológica, os sistemas de depuração de efluentes de indústria de papel apresentam um segundo clarificador, a fim de retirar os sólidos através de separação física. O Fluxograma convencional dos sistemas de tratamento de indústrias de papel é apresentado na Figura 1.



**Figura 1: Adaptado de SCOTT, 2001.**

Segundo Sperling (2001), nos processos de tratamento de efluentes industriais ocorre produção de lodo, associada aos sólidos presentes no efluente bruto e, principalmente, à biomassa que se desenvolve na etapa biológica do tratamento.

### 3.2.1 *Remoção de umidade do lodo*

A remoção de umidade é uma operação fundamental para a redução de massa e de volume do lodo em excesso a ser tratado ou descartado da estação de tratamentos de efluentes (ANDREOLI, 2001).

Os principais benefícios da remoção de umidade do lodo são:

- Redução do peso e do volume do lodo;
- Diminuição da produção do lixiviado, quando disposto em aterros;
- Melhoria das condições de manejo do lodo;
- Redução no custo de transporte e disposição;
- Aumento do poder calorífico do lodo, com vistas ao aproveitamento energético;

Segundo Sperling et al. (2001), a ligação da água aos sólidos nos lodos deve-se a forças intermoleculares de diferentes tipos, distribuindo-se em quatro classes distintas, de acordo com a facilidade de separação:

- água livre;
- água adsorvida;
- água capilar;

→ água celular.

A remoção da água livre é realizada de forma consistente por simples ação gravitacional ou por flotação. Um exemplo seria o que ocorre nos processos de adensamento, como os adensadores e as cetrífugas. A eficiência do adensamento pode resultar na redução de volume do lodo da ordem de 60% com relação ao volume original (ANDREOLI, 2001).

A água adsorvida e a água capilar exigem forças consideravelmente maiores para serem separadas. Estas forças podem ser de origem química, quando do uso de flocculantes, ou mecânicas, mediante o uso de processos de desaguamento mecanizados, tais como filtros prensa, prensas desaguadoras ou centrífugas. Teores de sólidos superiores a 30% podem ser obtidos, resultando em um material denominado torta, de aparência semi-sólida ou granular (ANDREOLI, 2001).

A água celular é parte da fase sólida e só pode ser removida através de forças térmicas que provoquem uma mudança no estado de agregação da água. Nesse sentido, o processo de secagem térmica é uma das mais eficientes formas de remoção de umidade de “tortas” de lodo. Um teor de sólidos de até 95% pode ser obtido, tendo como produto final um sólido em pó (ANDREOLI, 2001).

### **3.3 Geração e gerenciamento de resíduos em indústrias de papel**

Os resíduos sólidos de indústrias de papel são provenientes do processo produtivo, como refugos e embalagens e também do processo de tratamento de efluentes que gera, além do efluente líquido, grandes quantidades de sólidos na forma de lodo.

A indústria de reciclagem de papel, em especial, é responsável pela geração de elevados volumes diários de resíduos e, assim como outras indústrias, tem altas despesas com a necessidade de uma adequada destinação final para seus rejeitos (IBEIRO, 2007).

Em geral, o lodo proveniente do processo de reciclagem de fibras celulósicas representa a maior parte dos resíduos gerados e apresenta característica de uma massa fibrosa de cor acinzentada, sendo classificado como um resíduo classe IIA – não inerte (KAWATOKO, 2009).



### **3.3.1 Disposição de resíduos industriais**

Na indústria de papel, praticamente todos os resíduos sólidos são reaproveitados ou reciclados internamente como é o caso do refugo de papel, que é re-processado, ou externamente em empresas recicladoras, como é o caso dos resíduos metálicos e plásticos.

O grande desafio é a destinação dos resíduos gerados nos sistemas de tratamento de efluentes, designados de lodo biológico, os quais são classificados como resíduos não inertes. A definição do sistema de disposição final deste lodo deverá levar em consideração os aspectos técnicos, econômicos, operacionais e ambientais e as características do lodo, procurando garantir a forma mais adequada de disposição (ANDREOLI, 2001).

No Brasil, a alternativa mais empregada para disposição final de lodo é o aterro industrial. Embora seja uma técnica apropriada de destinação, a disposição em aterros está longe de ser a mais adequada, em virtude da ocupação de grandes espaços e dos riscos de contaminação de águas subterrâneas e de emissões de poluentes atmosféricos.

Do aterro sanitário é emitido gás metano (CH<sub>4</sub>) produzido da decomposição do resíduo enterrado na ausência de oxigênio, que possui um potencial vinte e cinco vezes maior que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de causar danos ambientais por efeito estufa (BALESTIERI, 2001).

### **3.4 Aproveitamento Energético do Lodo**

A adequada destinação final do lodo de ETE de indústria de papel é necessária, mas encontra várias dificuldades: os volumes gerados são significativos, os espaços para disposição dos mesmos se tornam cada vez mais escassos e os custos com as instalações necessárias que atendem às exigências técnicas para um armazenamento apropriado, são elevados (IBEIRO, 2007). Além disso, há o risco do passivo ambiental, mesmo após a destinação final.

Na ótica sustentável, a eliminação final do lodo através da incineração ou pela disposição em aterros sanitários é empregada apenas quando sua valorização é impossível (SPERLING, 2001).

A Lei nº14.675/2009, que institui o código estadual de meio ambiente define valorização de resíduos como a “operação que permite a requalificação de resíduos por meio de reutilização, reciclagem, valorização energética e tratamento para outras aplicações.

Encontrar aplicabilidade para os resíduos industriais é uma solução eficaz no sentido de buscar minimizar os problemas relacionados à geração dos mesmos. Muitos podem ser transformados em matérias-primas para outras linhas de produção, ou utilizados como material alternativo na substituição de recursos naturais (IBEIRO, 2007).

Diversas são as possíveis aplicações para o lodo de indústria de papel, dependendo das características do resíduo, do investimento que se pretende aplicar e do contexto em que a indústria geradora está inserida. Há trabalhos desenvolvidos no sentido de incorporação em materiais de construção, incorporação no solo, compostagem, entre outros.

Neste trabalho pretende-se focar o aproveitamento energético do lodo através da queima em caldeira, alternativa que será apresentada nos tópicos subseqüentes.

### **3.4.1 Biomassa**

Uma substância para ser usada como combustível deve ser abundante na natureza, desprender suficiente quantidade de calor ao ser oxidada e apresentar um custo relativamente baixo. A biomassa se destaca neste primeiro requisito em função de ser facilmente encontrada na natureza e nos residuais de processos agrícolas e industriais.

Os tipos de biomassas usadas para geração de energia incluem (Zevenhoven, 2001, citado em MACEDO 2006):

- Árvores como pinus e eucalipto;
- Resíduos de madeira como galhos, folhas, raízes;
- Resíduos do corte e beneficiamento da madeira, como serragem e cavacos;
  - Resíduos de colheitas como casca de arroz e casca de amendoim: resíduos agroindustriais como lignina e bagaço de cana-de-açúcar;
  - Resíduos de efluentes como lodo de estação de efluentes industriais;
  - Resíduos aglomerado, ou *pellets* de refino e re-refino de óleo na indústria petrolífera;
  - Resíduos domésticos.

Esta diversidade e a facilidade de obtenção tornam a biomassa atraente tanto para complementar outros combustíveis, como para

combustível principal nas mais variadas fontes de geração de energia no mundo.

### **3.4.2 Poder calorífico**

A quantidade de energia liberada por um combustível durante sua queima é chamada de poder calorífico. Todo o balanço de combustão em uma caldeira baseia-se nesta característica, pois determina qual a quantidade de combustível deve ser queimada por hora para gerar o calor necessário para evaporar a água e para compensar perdas. O poder calorífico pode ser denominado de inferior ou superior (BATISTA, 2007).

O poder calorífico superior (PCS) é a “quantidade de calor liberado durante a combustão de um quilograma de combustível sólido ou líquido ou de um metro cúbico de combustível gasoso, sob a condição de condensação do vapor de água e arrefecimento dos produtos de combustão até 25 °C” (VLASSOV, 2001). O poder calorífico superior refere-se ao combustível puro, enquanto que o poder calorífico inferior (PCI) ao combustível comercial, pois inclui a entalpia necessária para a vaporização da água. O poder calorífico inferior é mais utilizado nos cálculos e na prática, particularmente, para combustíveis com grande teor de umidade (BATISTA, 2007).

### **3.4.3 Queima de lodo em caldeira**

O relatório europeu de Melhores Práticas da Indústria de Papel e Celulose (IPPC, 2001) informa que é incomum a queima de lodo de efluente sozinho em caldeiras de produção de vapor, geralmente utiliza-se uma queima suplementar para manter a ignição, devido ao baixo poder calorífico do resíduo e a baixa concentração de cinzas.

- **Caldeira a Vapor de Grelhas Rotativas**

Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. Nas unidades de processo, o vapor é utilizado como fonte de transporte de energia térmica, obtido através da oxidação de um combustível na fornalha, liberando calor para a vaporização da água (BATISTA, 2007).

Conforme o tipo, as caldeiras podem ser classificadas em flamotubulares ou aquotubulares. Nas caldeiras flamotubulares os gases quentes da combustão passam por dentro dos tubos ao redor dos quais

está a água a ser aquecida e evaporada. Este tipo de caldeira é empregado para pequenas capacidades, produzindo apenas vapor saturado de baixa pressão. As caldeiras aquotubulares apresentam circulação de água por dentro dos tubos enquanto os gases de combustão ficam do lado de fora. As caldeiras deste tipo têm uma maior capacidade de produção de vapor a uma pressão mais alta (BATISTA, 2007).

De acordo com a pressão do vapor gerado, as caldeiras são classificadas do seguinte modo (Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão NR-13):

- Categoria A: pressão de operação  $>$  ou  $= 20 \text{ kgf/cm}^2$
- Categoria B: entre  $20 \text{ kgf/cm}^2$  e  $6 \text{ kgf/cm}^2$
- Categoria C: pressão de operação  $<$  ou  $= 6 \text{ kgf/cm}^2$  e o volume é igual ou inferior a 100 litros.

Todas as caldeiras são constituídas pelas seguintes partes fundamentais: tubulões, feixe de tubos, queimador para combustíveis líquidos e gasosos ou dosadores para combustíveis sólidos, câmara de combustão, chaminé, ventiladores e instrumentação. Além destas partes, as caldeiras devem estar associadas a um sistema de armazenamento de combustível, a um sistema de alimentação do combustível até a câmara de combustão, a um sistema de tratamento de gases para a minimização das emissões e a todo um sistema de distribuição de vapor para a fábrica.

A fornalha ou câmara de combustão é a parte do gerador de vapor onde é queimado o combustível utilizado para a produção de vapor. O método mais tradicional para combustíveis sólidos é a combustão em grelhas de movimentação, de vibração ou de rotação. Além das grelhas, a câmara de combustão dispõe de um espaço livre para o desenvolvimento das chamas e de um espaço localizado abaixo da grelha denominado depósito de cinzas, pelo qual penetra parte do ar necessário à combustão (BATISTA, 2007).

Dependendo do combustível, a cinza pode representar até 40% da massa de alimentação. Por esta razão, quando uma caldeira que queima combustível sólido for projetada, sempre deve ser levado em conta aspectos tais como: a remoção da cinza da caldeira, o seu armazenamento, o sistema de captação da cinza volante e o destino da cinza gerada.

## 3.5 Legislação

### 3.5.1 Resíduos Sólidos

A Resolução CONAMA nº 316 de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

No artigo 2º, considera-se para os fins desta Resolução:

*I – Resíduos: os materiais ou substâncias, que sejam inservíveis ou não passíveis de aproveitamentos econômico, resultante de atividades de origem industrial, urbana, serviços de saúde, agrícola e comercial dentre os quais incluem-se aqueles provenientes de portos, aeroportos e fronteiras, e outras, além dos contaminados por agrotóxicos.*

*II - Melhores técnicas disponíveis: o estágio mais eficaz e avançado de desenvolvimento das diversas tecnologias de tratamento, beneficiamento e de disposição final de resíduos, bem como das suas atividades e métodos de operação, indicando a combinação prática destas técnicas que levem à produção de emissões em valores iguais ou inferiores aos fixados por esta Resolução, visando eliminar e, onde não seja viável, reduzir as emissões em geral, bem como os seus efeitos no meio ambiente como um todo.*

A Resolução CONAMA nº 313 de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

No artigo 2º, para fins desta Resolução entende-se que:

*I - Resíduo sólido industrial é todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido e gasoso – quando contido, e líquido – cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.*

Os resíduos industriais são classificados de acordo com a Norma NBR 10004 (ABNT, 1987).

- Resíduos Perigosos (Classe I): Apresentam periculosidade à saúde pública e ao meio ambiente devido as suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, através da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

- Resíduos Não-Inertes (Classe IIA): Incluem-se nesta classe os resíduos potencialmente biodegradáveis, combustíveis ou solúveis, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I.

- Resíduos Inertes (Classe IIB): São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção dos aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

### **3.5.2 Emissões Atmosféricas**

A maioria dos poluentes que saem pela chaminé são material particulado (PM), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), carbonos orgânicos voláteis (VOC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e combustíveis não queimados, incluindo numerosos compostos orgânicos (MACEDO, 2006).

A geração de produtos de combustão indesejados é fortemente influenciada pelo tipo de combustível, tipo de fornalha, configuração de queima e condições de operação da caldeira (USEPA, 2001).

A Lei n<sup>o</sup> 14.675/2009, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina, dispõe somente sobre as emissões visíveis, que deve permanecer em valores menores que 20% na escala *Ringelmann*, salvo tolerância de 15 minutos por dia.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução n<sup>o</sup> 382/2006, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para processos de combustão em fontes fixas de acordo com o tipo de combustível utilizado. O anexo IV desta resolução determina os limites de emissão para material particulado e óxidos de

nitrogênio provenientes de processo de geração de calor a partir da combustão externa de derivados de madeira, conforme Tabela 1.

**Tabela 1: Limites de emissão de poluentes atmosféricos para geração de calor a partir de combustão externa de derivados de madeira**

Potência térmica nominal (MW)	MP <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup> (como NO <sub>2</sub> )
Menor que 10	730	N.A.
Entre 10 e 30	520	650
Entre 30 e 70	260	650
Maior que 70	130	650

<sup>(1)</sup> os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm<sup>3</sup>, em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.  
N.A. - Não aplicável.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Situação Física

A indústria de papel em questão está situada no município de Correia Pinto, região serrana de Santa Catarina. O setor de papel e celulose se destaca na geração de emprego e renda local.

O lodo gerado no processo é proveniente da Estação de tratamento de efluentes da planta, que recebe o efluente líquido da máquina de papel, e do processo de reciclagem de aparas. O tratamento do lodo consiste na retirada de umidade através de aplicação de polímero e passagem por dois equipamentos: o engrossador e a prensa desidratadora.

No final do deságüe, o material passa para uma esteira transportadora, que encaminha o lodo com umidade média de 52% até os caminhões que o transportam à aterro industrial classe II, localizado no município de Otacílio Costa, a 60 km de distância. Por mês, são geradas em média 2.000 toneladas de lodo.

### 4.2 Dados da caldeira

A caldeira de grelha rotativa se localiza dentro da empresa e gera todo o vapor utilizado no processo, em unidades da reciclagem de fibra e principalmente no processo de secagem durante a fabricação da folha de papel.

A caldeira de biomassa é do tipo mista. Na parte inferior o sistema é Aquatubular, a água passa por dentro dos dutos e é aquecida pela queima da biomassa que ocorre externamente nas grelhas. Na parte superior da caldeira o conceito é flamotubular, ou seja, os gases quentes passam no interior das tubulações e aquecem a água na parte externa.

Em relação ao equipamento outras informações são relevantes:

- Capacidade de geração de vapor: 2.000 kg/hora com entrada de água a 90°C;
- Combustível principal: resíduos de madeira;
- Combustível secundário: *pellets* de refinarias e lodo de ETEI;
- Pressão de Trabalho: 22 kgf/cm<sup>2</sup>;

Antes da liberação de queima do lodo, o consumo médio de biomassa padrão, constituída de uma mistura de serragem e pellets de refinaria num percentual de 80 e 20%, respectivamente, era de 65 toneladas por dia. A unidade de vapor gera em média 800 kg/dia de um resíduo de queima, constituído de cinzas e fuligem.

A caldeira foi adquirida em comodato com a empresa fabricante, que recebe mensalmente por quantidade de vapor gerado.

### **4.3 Materiais e Métodos**

A etapa inicial do trabalho consistirá na classificação de amostras de lodo solubilizado e lixiviado e do potencial energético do lodo. Os ensaios serão realizados em laboratórios contratados e terão como referência as seguintes normas brasileiras:

- NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata, destinada à determinação dos teores de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo de carvão vegetal;
- NBR 8633 – Determinação do Poder Calorífico: prescreve o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática;
- NBR 6922 – Determinação da Massa Específica (Densidade a Granel): prescreve o método de determinação da massa específica do carvão vegetal como recebido.
- ABNT NBR 10004 - Classificação de Resíduos Sólidos: Esta Norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos



potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

- ABNT NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos: Fixar os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, diferenciando os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos.
- ABNT NBR 10006 - Solubilização de Resíduo: Fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos visando diferenciar os resíduos Classe IIA e IIB.

De acordo com os resultados dos ensaios de poder calorífico, será definido, mediante a autorização do órgão ambiental e em consenso com a empresa fabricante da caldeira, os percentuais de mistura do lodo à composição da biomassa atual (20% de pellets de carbono e 80% de serragem) para realização de testes de queima na caldeira rotativa.

Os testes em caldeira têm por objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação do lodo na mistura de biomassa, mediante observação do comportamento da eficiência da caldeira, da taxa de consumo e geração de resíduos e também da emissão de gases na chaminé durante a operação.

O teste inicial terá por objetivo monitorar os gases e particulados gerados, tendo como referência os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 382/2006. O planejamento, a amostragem e as análises de emissões atmosféricas serão realizados de acordo com as seguintes normas:

- NBR 10.700: Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias;
- NBR 10.701: Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias;
- NBR 12.020: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados em amostragens;
- NBR 11.967: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da umidade;
- NBR 10702: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da massa molecular em base seca;
- NBR 11.966: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da velocidade e vazão;

- NBR 12.019: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de material particulado;

Durante o teste de queima em caldeira também pretende-se avaliar os seguintes aspectos de operação: consumo de biomassa, eficiência da geração de vapor, a geração de cinzas, as emissões de material particulado e a quantidade de cinzas gerada, comparando com a queima de biomassa padrão sem o lodo.

Por fim, pretende-se realizar uma comparação econômica da incorporação do lodo através do levantamento dos custos de transporte e destinação atual do resíduo e da estimativa de custo da incorporação do lodo na biomassa para queima em caldeira.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização do Lodo

O lodo derivado do tratamento de efluentes dos processos de reciclagem e fabricação de papel foi caracterizado conforme ensaios realizados de acordo com a Norma NBR 10004.

A Tabela 2 indica a composição elementar deste resíduo.

**Tabela 2: Composição Elementar do Lodo de ETEI de indústria de papel**

Parâmetros	Resultados
Aspecto	Semi-Sólido
Carbono (%)	8,23
Materiais Voláteis (%)	63,01
Cinzas (%)	28,75
Densidade Aparente	1,06
Umidade	52
pH 1:1	7,56

Conforme as Normas NBR 10005 e NBR 10006, para enquadramento nas classes de resíduos, as características químicas foram determinadas na Massa Bruta, no Extrato Solubilizado e no Extrato Lixiviado, conforme apresentado no Apêndice A.

Nas análises de lixiviação e massa bruta do resíduo, todos os parâmetros ficaram abaixo do valor máximo determinado, o que exclui a possibilidade de periculosidade e enquadra o mesmo sendo de classe II.

Nos ensaios de solubilização, alguns compostos como o alumínio, fenol, ferro total e manganês, se solubilizaram em fração maior que o valor máximo determinado, característica que enquadra o resíduo como Não-inerte ou Resíduo Classe IIA.

## 5.2 Avaliação do Poder Calorífico

Para a utilização do lodo para fins energéticos, deve-se conhecer seu poder calorífico e realizar uma análise química (imediata) em laboratório, para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo presentes na biomassa.

Foram avaliados separadamente a composição química imediata e o poder calorífico dos materiais constituintes da biomassa inicial, composta de serragem e pellets de carbono e também do resíduo que se deseja incluir na mistura, o lodo de ETE.

Cada amostragem foi repetida 4 vezes e a média dos resultados obtidos na análise química imediata na base seca e os valores médios de poder calorífico superior e inferior são apresentados nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

**Tabela 3: Composição química imediata na base seca**

Amostras	Materiais Voláteis		Carbono Fixo		Cinzas	
	Média(%)	*D.P.(%)	Média(%)	D.P.(%)	Média(%)	D.P.(%)
Pellets de carbono	<b>68,99</b>	1,34	<b>30,48</b>	1,32	<b>0,54</b>	0,02
Serragem de madeira	<b>78,52</b>	3,1	<b>18,25</b>	0,52	<b>3,23</b>	0,29
Lodo de ETE	<b>63,01</b>	0,41	<b>8,23</b>	0,95	<b>28,75</b>	1,22

*\*D.P.=Desvio Padrão*

**Tabela 4: Poder calorífico inferior e superior**

Amostras	Poder Calorífico Superior		Poder Calorífico Inferior	
	Média (kJ/kg)	*D.P.	Média (kJ/kg)	D.P.
Pellets de carbono	<b>9324</b>	795	<b>8784</b>	536
Serragem de madeira	<b>4568</b>	74	<b>4244</b>	115
Lodo de ETE	<b>2867</b>	138	<b>2706</b>	58

\* D.P. = Desvio Padrão

De acordo com a análise de composição química imediata dos materiais, verifica-se que o teor de materiais voláteis do lodo é próximo ao teor de pellets de carbono. Por outro lado, o teor de carbono fixo é muito inferior aos outros materiais e o teor de cinzas é muito representativo. Essas características, aliada ao poder calorífico, que também se mostrou inferior ao da serragem e dos pellets de carbono, indicam que o lodo tem uma eficiência menor de queima e maior geração de cinzas, o que possivelmente vai impactar também nos testes em caldeira.

### **5.3 Análise do Efluente Atmosférico**

Com base nos ensaios preliminares de classificação de resíduos, composição química imediata e poder calorífico, o órgão ambiental autorizou a inclusão de até 20% de lodo na composição da biomassa para realização de um teste em caldeira para que se pudesse monitorar a emissão de poluentes atmosféricos resultantes da queima desse material.

Para a análise foram considerados 3 diferentes cenários para a composição da biomassa, sendo que o primeiro se refere ao cenário atual e os outros a possíveis composições com lodo, considerando o limite estabelecido pelo órgão ambiental, no intuito de compará-los e avaliar o possível impacto da queima desse resíduo no efluente atmosférico da caldeira.

- Composição 1: Sem o resíduo, mistura de serragem e pellets, a 80% e 20%, respectivamente;
- Composição 2: Com adição de lodo a 20% na composição, serragem e pellets, a 60% e 20% respectivamente;
- Composição 3: Com adição de lodo a 14% na composição, serragem e pellets, a 58% e 28% respectivamente;

Os parâmetros monitorados foram material particulado (MP), NOx e densidade colorimétrica, cujos limites são estabelecidos na RESOLUÇÃO CONAMA N° 382. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5: Resultados da medição de emissões atmosféricas da caldeira**

Amostras	Limite Conama	Composição 1	Composição 2	Composição 3
MP (mg/Nm <sup>3</sup> )	520	57,2	118,7	64,9
NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	650	101,11	140,2	147,7
Densidade colorimétrica (%)	20	<20	<20	<20

Os resultados dos ensaios de emissões atmosféricas mostraram que o teor de material particulado e de óxidos de nitrogênio apresentou um aumento discreto nas composições 2 e 3, em relação à composição 1, isenta de lodo. Entretanto, esse resultado não compromete a qualidade do ar, uma vez que as concentrações de poluentes para todos os casos, ficou bem abaixo do limite estabelecido pela norma.

#### 5.4 Teste de Queima em Caldeira

Após a apresentação dos laudos de características do resíduo e de emissões atmosféricas, o órgão ambiental concedeu à empresa uma permissão temporária, válida por 5 meses, período de testes de inclusão do resíduo na biomassa para queima em caldeira, com a finalidade de avaliar os possíveis impactos do lodo na queima a médio prazo.

Durante essa etapa o limite de uso de lodo na composição da biomassa foi de 400 toneladas mês. Sabendo que mensalmente são utilizadas em média, 2000 toneladas de biomassa, o lodo seria inserido em um percentual de até 20% da mistura.

Foram monitorados os seguintes aspectos:

- ✓ o percentual de lodo na biomassa;
- ✓ a eficiência de geração de vapor;
- ✓ a geração de resíduos de queima;
- ✓ as emissões atmosféricas através de densidade colorimétrica;

A Tabela 6 representa o consumo de biomassa, o consumo de lodo e o percentual da mistura. No final do segundo mês de testes, houve um problema técnico de incrustação das grelhas, o que de acordo com o fabricante do equipamento, poderia ter relação com o resíduo incorporado à biomassa. Em decorrência desse fato, nos meses subsequentes, a incorporação de lodo foi suspensa até recebimento do laudo da causa do problema, que apresentou outro motivo como causa raiz do fato. O lodo voltou a compor a biomassa no dia 26 do mês 5.

**Tabela 6**

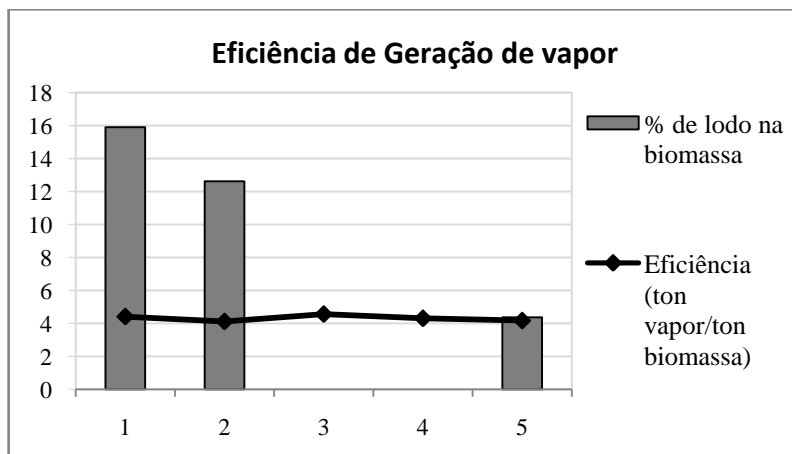
<b>Percentual de lodo na composição da biomassa</b>					
<b>Mês</b>	<b>Consumo de biomassa (ton)</b>	<b>Quantidade Serragem (ton)</b>	<b>Quantidade Pellets (ton)</b>	<b>Quantidade Lodo (ton)</b>	<b>% de lodo na biomassa</b>
1	2141	1621	180	340	15,9
2	1924	1513	168	243	12,6
3	2038	1834	204	0	0,0
4	1858	1672	186	0	0,0
5	2084	1794	199	91	4,4

Para avaliar o impacto do lodo na eficiência da caldeira, foram comparados dois indicadores: (1) a eficiência, dada pelo total de vapor gerado por tonelada de biomassa que entrou no sistema e (2) o percentual de lodo no sistema.

**Tabela 7**

<b>Eficiência de Geração de Vapor</b>				
<b>Mês</b>	<b>Consumo biomassa (ton)</b>	<b>Vapor gerado (ton)</b>	<b>Eficiência (ton vapor/ton biomassa)</b>	<b>% de lodo na biomassa</b>
1	2141	9467	4,42	15,9
2	1924	7935	4,12	12,6
3	2038	9314	4,57	0,0
4	1858	8017	4,31	0,0
5	2084	8704	4,18	4,4

No Gráfico 2, é possível visualizar o comportamento da caldeira, no que se refere à eficiência de geração de energia, indicador obtido através do cálculo de toneladas de vapor produzidas *versus* o consumo de biomassa, quando comparado ao percentual de lodo utilizado na composição da biomassa combustível.



**Figura 2: Gráfico da eficiência de geração de vapor**

Considerando que o poder calorífico do lodo se mostrou inferior ao da serragem e do pellet, a inclusão deste resíduo poderia diminuir a eficiência da caldeira, ou em outras palavras, aumentar o consumo de biomassa. Entretanto, verificou-se na prática que a eficiência de geração de vapor não sofreu influência proporcional ao percentual de lodo. Isso demonstra que o resíduo, no percentual em que foi incorporado, não afetou consideravelmente a eficiência da caldeira.

As análises de composição química imediata (Tabela 3) apontaram que o percentual de cinzas no lodo é cerca de nove vezes maior do que na serragem. Para avaliar essa característica na prática a geração de cinzas foi monitorada ao longo do período, como mostra a Tabela 8.

**Tabela 8**

Geração de Resíduos de Queima				
Mês	Consumo biomassa (ton)	Consumo de lodo	Geração de cinzas (ton)	% Resíduo gerado
1	2141	340	75,44	3,5
2	1924	243	80,86	4,2
3	2038	0	25,20	1,2
4	1858	0	24,48	1,3
5	2084	91	43,50	2,1

Constatou-se que o percentual de geração de resíduos em relação ao consumo de biomassa foi maior nos meses de maior consumo de lodo, conforme esperado. Os resíduos de queima são constituídos de cinzas geradas na câmara de combustão e de fuligem captada no filtro de mangas. É importante ressaltar que o comportamento da geração de resíduos na caldeira pode também sofrer influência de outros fatores, como a umidade da biomassa utilizada, temperatura na câmara de combustão, entre outros.

Os parâmetros de emissões atmosféricas foram medidos no teste específico. Durante a presente etapa, monitorou-se somente emissões de particulados através de densidade colorimétrica da escala de Ringelmann. A densidade colorimétrica não foi superior ao padrão 1 por nenhum período maior que o determinado na Lei Estadual nº 14.675/2009.

## **5.5 Avaliação da Viabilidade Econômica**

Para estabelecer a viabilidade do projeto em termos de retorno financeiro, foram comparados dois cenários: o inicial e o que se pretende obter com a incorporação do resíduo na biomassa.

O cenário inicial corresponde a situação na qual o total de lodo gerado na estação de tratamento de efluentes da planta é enviado à aterro industrial. O aterro está localizado no município de Otacílio Costa, a uma distância de 50 km da planta. O custo de transporte e disposição em aterro é calculado em toneladas.

- ✓ Custo de transporte e disposição por tonelada de lodo = R\$ 80,00

O segundo cenário corresponde à incorporação de lodo na biomassa para queima em caldeira. O custo para essa situação seria o de transporte até a estação de blendagem da biomassa, à 7 Km da planta. Há um custo adicional, pago à empresa fabricante da caldeira, pela concessão da queima de resíduo, conforme acordo em contrato, por considerar o menor poder calorífico e maior geração de cinzas do lodo. Esta taxa adicional é calculada por tonelada de vapor disponibilizada.

- ✓ Custo de transporte por tonelada de lodo = R\$ 7,40;
- ✓ Taxa excedente por tonelada de vapor gerado em função da incorporação do lodo = R\$ 1,00;
- ✓ Neste cenário, o custo de disposição das cinzas já está incluído no custo excedente por vapor gerado, uma vez que o



equipamento opera em comodato e a empresa fabricante é responsável pela disposição final de resíduos.

No caso hipotético de queima do limite autorizado, de 400 toneladas em um mês, e a geração de vapor seja de 8.700 toneladas, a redução de custos seria expressa da seguinte forma:

Valor evitado com disposição em aterro industrial:

$$Total_{frete+disposição} = 400 \text{ ton} * R\$ 80,00$$

$$Total_{frete+disposição} = R\$ 32.000,00$$

Valor gasto com transporte e geração de vapor:

$$Valor_{frete \text{ blendagem}} = 400 \text{ ton} * R\$ 7,40 = R\$ 2.960,00$$

$$Valor_{excedente} = 8.700 \text{ ton} * R\$ 1,00 = R\$ 8.760,00$$

A economia de custos mensal para esse caso seria expressa da seguinte maneira:

$$Economia = R\$ 32.000,00 - R\$ 2.960,00 - R\$ 8.760,00$$

$$Economia = R\$ 20.280,00/mês$$

Com este cenário, no período de um ano, a economia poderia chegar a R\$ 243.360,00.

Na prática, em nenhum dos meses de testes se atingiu a cota máxima de queima de lodo. O comparativo financeiro está representado na Tabela 9.

**Tabela 9: Balanço financeiro da incorporação de lodo na biomassa**

<b>Balanço financeiro</b>						
		<b>Economia</b>	<b>Custo</b>	<b>Vapor</b>	<b>Aumento</b>	
<b>Mês</b>	<b>Lodo (ton)</b>	<b>aterro (R\$)</b>	<b>transporte (R\$)</b>	<b>gerado (ton)</b>	<b>custo vapor</b>	<b>Economia mensal</b>
1	340,35	27.228,00	2.518,59	9467	9.467,00	<b>15.242,41</b>
2	242,92	19.433,60	1.797,61	7935	6.083,50	<b>11.552,49</b>
3	0	0,00	0,00	9314	0,00	<b>0,00</b>
4	0	0,00	0,00	8017	0,00	<b>0,00</b>
5	91	7.280,00	673,40	8704	2.901,33	<b>3.705,27</b>

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi avaliar o uso de lodo gerado em estação de tratamento de efluentes de indústria de papel tissue na composição da biomassa utilizada para queima em caldeira de grelhas rotativas. A partir dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto, pode-se concluir que:

- O resíduo é classificado de acordo com a Norma NBR 10004, como resíduo de Classe IIA, ou seja resíduo não perigoso e não inerte;
- As características do resíduo, avaliadas em laboratório, demonstram que o mesmo possui eficiência de queima inferior aos outros componentes da biomassa, ao mesmo tempo em que o teor de cinzas é consideravelmente superior, o que reflete na geração de resíduos de queima;
- Na análise de emissões atmosféricas da queima, nenhum dos parâmetros excedeu os limites estabelecidos pela legislação aplicável em nenhuma das situações avaliadas;
- Nos testes de queima em caldeira, não foi possível identificar prejuízos à eficiência de geração de vapor com a inclusão do lodo em até 15,9% na composição de biomassa;
- Houve um aumento significativo na geração de resíduos de queima, quando da incorporação do lodo, conforme previsto através de análise do teor de conza do resíduo;
- Foi constatado que a queima do resíduo de ETE em caldeira representa uma economia considerável para a empresa, que pode alcançar o valor de R\$ 20.000,00 por mês.

Num panorama geral, pode-se afirmar que a incorporação do resíduo da estação de tratamento de efluentes industriais da empresa se mostrou uma alternativa viável nos aspectos técnico, ambiental e financeiro. Além dos benefícios para a empresa, os ganhos vão além, pois uma grande quantidade deixa de ser encaminhada à aterro, o que prolonga a vida útil do mesmo e a demanda por biomassa para geração de energia diminui, o que contribui no que se refere ao esgotamento das fontes energéticas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS. Disponível em <http://www.abetre.org.br>. Acesso em: 20 de abril de 2010.

ANDREOLI, C. V. et Al. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Departamento de engenharia sanitária e ambiental – Editora UFMG. Companhia de saneamento do Paraná, 2001. 484p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; 6).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BALESTIERI, J.A.P. **Avaliação tecnológica e método lógico para avaliação e planejamento de centrais de cogeração**. Relatório (Pós-Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BATISTA, E.R.S. **Balanco energético da queima da casca de arroz em uma empresa de parboilização com o processo Malek**. Dissertação (em Engenharia) – Pós graduação em engenharia: energia, ambiente e materiais, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2007.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Resolução n. 313, de 29 de outubro de 2002.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Resolução n. 316, de 29 de outubro de 2002.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Resolução n. 382, de 26 de dezembro de 2006.

ESCANDOLHERO, J. M; SOUZA, A. M; HESS, S. C. Reciclagem de papel em Campo Grande/MS e outros locais. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre. **Anais com XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.**

GALLON, A. V; SALAMONI, F. L; BEUREN, I. M; Tratamento dos resíduos no processo de fabricação de papel reciclado em indústria de Santa Catarina. In: XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2006, Fortaleza. **Anais do encontro nacional de engenharia de produção.**

HARDT, W. Cilindros yankees e inspeções sistemáticas: parceiros inseparáveis. **Revista O Papel**, São Paulo, p. 66-67, dezembro de 2008.

IBEIRO, L. S. **Caracterização de resíduo de indústria de papel para utilização como material geotécnico.** Dissertação (mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

IPPC – EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL. **Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry.** Sevilha: IPPC, 2001. 550 p.

KAWATOKO, I. E. S. Avaliação das características de um lodo de ETE visando seu tratamento por compostagem. In: 8ª Jornada Científica e Tecnológica da Universidade Federal de São Carlos, 2009, São Carlos. **Anais de Eventos da UFSCar**, v. 5, p. 463.

MACEDO, J. C. F. **Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha.** Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

NORMA REGULAMENTADORA, BRASIL. NR-13: Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão. – Edição comemorativa 10 anos da NR-13. – 1. reimpressão. – Brasília : MTE, SIT, DSST, 2006.124 p.

PERECIN, L. Reciclar é preciso. **Revista O Papel**, n. 10, São Paulo, p.56-62, Outubro de 2005.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel – Estudo de caso**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2003.

SANTA CATARINA. **LEI Nº 14.675**, de 13 de abril de 2009. Disponível em <[www.sc.gov.br/downloads/Lei\\_14675.pdf](http://www.sc.gov.br/downloads/Lei_14675.pdf)>. Acessado em: 26/06/2009.

SCOTT, G. M. et al. Sludge characteristic and disposal alternatives for recycled fiber plants. In: 3º TAPPI RECYCLING SYMPOSIUM. **Recycling Symposium Proceedings**. Nova Orleans: 1995. p. 239-249.

SPERLING, M. V. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**; v.2 e v. 5. 2ed - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Preferred and alternative methods for estimating air emissions from boilers: Emission inventory improvement program. v. II, Cap. 2, 92 p. Washington: USEPA, 2001.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. 1ª ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2001. 186 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata, destinada à determinação dos teores de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo de carvão vegetal: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: Determinação do Poder Calorífico. ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Determinação da Massa Específica. ABNT, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.700**: Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.701**: Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.020**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Calibração dos equipamentos utilizados em amostragens: ABNT, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.967**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da umidade: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.702**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da massa molecular em base seca: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.966**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da velocidade e vazão: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.019**: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de material particulado: ABNT, 1990.

**APÊNDICE A** – Ensaio de classificação de resíduos do lodo.

Parâmetros	Massa Bruta		Lixiviado		Solubilizado	
	VMP	Obtido	VMP	Obtido	VMP	Obtido
	mg/Kg	mg/Kg	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Alumínio	-	-	-	-	0,2	0,287
Arsênio e compostos	-	-	1	ND	0,01	ND
Bário	-	-	70	3	0,7	1
Cádmio	-	-	0,5	0,01	0,005	<0,003
Chumbo	-	-	1	<0,05	0,01	<0,05
Cianeto	-	-	-	0,023	0,07	<0,013
Cianeto (liberável)	250	0,46	-	-	-	-
Cloreto	-	-	-	-	250	31,4
Cobre	-	-	-	-	2	0,011
Cromo Total	-	-	5	0,031	0,05	0,018
Fenol	-	-	-	-	0,01	0,108
Ferro Total	-	-	-	-	0,3	3,1
Fluoreto	-	-	150	0,26	1,5	ND
Hexacloro benzeno	-	-	-	-	1x10 <sup>-3</sup>	ND
Manganês	-	-	-	-	0,1	0,706
Mercúrio	-	-	0,1	ND	0,001	ND
Nitrato (Expresso em N)	-	-	-	-	10	1,5
Prata	-	-	5	<0,07	0,05	ND
Selênio	-	-	1	ND	0,01	ND
Sódio	-	-	-	-	200	23
Sulfato (Expresso em SO <sub>4</sub> )	-	-	-	-	250	ND
Surfactantes	-	-	-	-	0,5	0,12
Zinco	-	-	-	-	5	0,019