

MAXWEL GUAITOLINI

**ESTUDO DA QUEIMA DO LODO SECUNDÁRIO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE
EM CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G898e
2014 Guaitolini, Maxwel, 1963-
Estudo da queima do lodo secundário da indústria de
celulose em caldeira de leito fluidizado. / Maxwel Guaitolini. –
Viçosa, MG, 2014.
vi, 44f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Adair José Regazzi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 33-34.

1. Indústria de celulose. 2. Resíduos industriais. 3. Caldeira
de leito fluidizado. 4. Lodo residual. 5. Biomassa.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-graduação em Tecnologia de
Celulose e Papel. II. Título.

CDD 22. ed. 363.728

MAXWEL GUAITOLINI

**ESTUDO DA QUEIMA DO LODO SECUNDÁRIO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE
EM CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de julho de 2014

Cláudio Mudado Silva

Fernando José Borges Gomes

Adair José Regazzi
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À minha família, que tanto me incentivou, me apoiando incondicionalmente durante todo o trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação Profissionalizante em Tecnologia de Celulose e Papel, pelos ensinamentos.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação, pelo companheirismo e incentivo.

À Fibria, Três Lagoas – MS, pela oportunidade de realização da pesquisa.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1.INTRODUÇÃO.....	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 MATÉRIA PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CELULOSE.....	3
2.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE POLPA CELULÓSICA	4
2.3 PROCESSO INDUSTRIAL DE OBTENÇÃO DE POLPA CELULÓSICA.....	5
2.3.1 Pátio e Madeira.....	7
2.3.2 Impregnação dos Cavacos.....	7
2.3.3 Processo de Cozimento.....	7
2.3.4 Processo de Polpa Celulósica.....	8
2.3.5 Branqueamento de Polpas Celulósicas.....	8
2.4PROCESSOS DE FORMAÇÃO DE RESÍDUOS.....	9
2.4.1 Caracterização do Resíduo.....	10
2.5TIPOS DE RESÍDUOS.....	11
2.5.1 Lodos Biológicos.....	12
2.5.2 Lodos Primários.....	13
2.6PROCESSO DE QUEIMA EM CALDEIRAS DE BIOMASSA	13
2.7 DESCRIÇÃO DA CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE.....	14
3.MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 ESTUDO DE CASO	17
3.2 MÉTODOS.....	17
3.2.1 Diagrama de Blocos e Balanço de Massa Simplificado.....	18
3.2.2 Descrição do Método.....	19

3.2.3 Descrição do Processo da Mistura.....	19
3.2.4 Descritivo do Teste.....	20
3.3 ANÁLISES REALIZADAS.....	21
3.3.1 Plano de Amostragem.....	21
3.3.2 Análise Estatística.....	23
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	23
4.2 TESTE DE QUEIMA DO LODO EM CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO	24
4.2.1 Teor de Umidade.....	25
4.2.2 Poder Calorífico.....	25
4.2.3 Produção de Vapor.....	26
4.2.4 Ar primário e Ar recirculante.....	27
4.2.5 Temperatura do Leito.....	29
4.2.6 Material Particulado.....	30
4.2.7 Taxa de Residual de Enxofre (TRS).....	31
5. CONCLUSÃO.....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33
ANEXOS.....	35
ANEXO 1.....	36
ANEXO 2.....	38
ANEXO 3.....	43

RESUMO

GUAITOLINI, Maxwel, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Estudo da Queima do Lodo Secundário da Indústria de Celulose em Caldeira de Leito Fluidizado.** Orientador: Adair José Regazzi. Coorientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira.

O setor de Celulose e Papel está em claro processo de expansão, crescimento este ocasionado pela criação de novas unidades fabris bem como pelo aumento de produção das unidades já existentes. No caso do aumento de produção em unidades já existentes, a falta de espaço físico para dispor os resíduos gerados pelo processo é um dos grandes problemas dessa indústria. Dentre os vários tipos de resíduos gerados, destaca-se o lodo biológico da estação de tratamento de efluentes, o qual é um resíduo derivado dos processos de polpação e branqueamento das fibras celulósicas e dos processos de refino e formação da folha de papel, tendo, originalmente, a prática de compostagem para sua disposição final. Para este tipo de disposição final, incluindo os custos de transporte do lodo até o local adequado, recursos financeiros elevados estão envolvidos. Desse modo, o objetivo deste trabalho é fornecer subsídios técnicos para queima de um resíduo gerado no processo de fabricação de papel e celulose da indústria Fibria-MS, o lodo secundário da estação de tratamento de efluentes, em uma caldeira de leito fluidizado de geração de vapor de alta pressão. No presente trabalho, o teste da queima de uma mistura de biomassa e lodo biológico em uma caldeira de leito fluidizado apresentou as seguintes tendências, quando comparado a um período controle (queima apenas de biomassa): redução do teor seco da amostra; redução do valor do poder calorífico tal qual; manutenção do valor de poder calorífico para a amostra seca; aumento da vazão de ar primário da caldeira; redução da vazão de ar recirculado na caldeira; manutenção da temperatura do leito, porém com maior variabilidade dos dados; aumento das emissões de material particulado e TRS da caldeira, entretanto, apresentando valores aceitáveis, segundo resolução do Conama. Foi possível concluir que a queima de lodo biológico da estação de tratamento em caldeira de leito fluidizado apresenta-se como uma prática atrativa à indústria de Celulose e Papel, contribuindo para a redução de ocupação do aterro sanitário.

ABSTRACT

GUAITOLINI, Maxwell, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2014. **Study of Cellulose Industry Secondary Sludge Burning in Fluidized Bed Boiler**. Advisor: Adair José Regazzi. Co-advisers: José Lívio Gomide and Rubens Chaves de Oliveira.

The lack of physical space to lay out waste generated by the process is one of the major problems faced by pulp and paper industry. The effluent treatment station's biological sludge is a residue derived from pulping, bleaching of cellulosic fibers, and papermaking process; originally having the composting practice as final disposition method. High financial resources are involved to this disposition practice, including sludge transporting costs to a suitable place. Thus, the objective of this work is to provide technical support for burning a waste generated by the pulp and papermaking process at Fibria-MS, the secondary sludge from effluent treatment station, in a high pressure steam generation fluidized bed boiler. In this study, the burst test of a biomass mixture and biological sludge in a fluidized bed boiler presented the following trends, when compared to a control period (burning biomass only): reduction of dry sample content; reduction of the calorific value as such; maintenance of the value of calorific value for the dry sample; increased boiler air flow; reduction of the recirculated air flow in the boiler; bed temperature maintenance, however with greater data variability; increase in particulate matter and TRS emissions of the boiler, yet, showing acceptable values, according to Conama resolution. It was possible to conclude that the burning of treatment station biological sludge in fluidized bed boiler presents itself as an attractive practice to the pulp and paper industry, contributing to reduced occupancy of the landfill.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, estão instaladas diversas fábricas de Celulose e Papel, constituindo uma atividade industrial expressiva para a economia brasileira.

Existe uma grande demanda de água nos processos de produção de Celulose e Papel. Uma vez utilizada no processo fabril, esta água retorna ao meio ambiente em forma de efluentes que, de acordo com a legislação, devem ser tratados antes de serem encaminhados para corpos de água receptores. Os efluentes provenientes de fábricas de papel apresentam elevado teor de matéria orgânica dissolvida e coloidal, que se lançada nos corpos de água receptores causará um impacto ambiental negativo como, por exemplo, a depleção do oxigênio dissolvido presente nesses corpos de água, podendo acarretar a morte de organismos aeróbios e tornar os corpos receptores impróprios para a biota aquática (SOUSA, 2002).

Em uma fábrica integrada de Celulose e Papel muitos são os resíduos gerados no processo de tratamento de efluentes. O lodo secundário da estação de tratamento de efluentes é um resíduo derivado dos processos de polpação e branqueamento da polpa celulósica e dos processos de refino e formação da folha de papel (transformação da matéria orgânica originária dos diversos setores da fábrica pela ação dos microrganismos presentes no reator biológico). Originalmente, esse lodo secundário tem como a disposição final o processo de compostagem. Para este tipo de disposição final, incluindo os custos de transporte do lodo até o local adequado e as grandes áreas demandadas para construção do pátio de compostagem, outros recursos financeiros elevados estão envolvidos. Atenta-se, ainda, ao odor desagradável em decorrência do seu manuseio, que sinalizam a necessidade de uma forma alternativa de descarte do lodo biológico.

Desse modo, o processo de gestão destes resíduos é importante para a indústria, tanto no âmbito econômico quanto ambiental. Conforme observado, os lodos gerados são materiais que impactam fortemente nos custos empresariais, dos quais são observados custos de processamento, tratamento e disposição. Ainda, seus volumes e pesos podem ser enormes para o setor. Assim, a falta de espaço físico para dispor os resíduos gerados pelo processo é também um dos grandes problemas da indústria de papel e celulose.

Sendo assim, a gestão dos lodos, feita de forma adequada, resulta em significativas vantagens econômicas, ambientais e sociais para as fábricas de celulose e papel.

O objetivo deste trabalho é fornecer subsídios técnicos para queima de um resíduo gerado no processo de fabricação de papel e celulose da indústria Fibria-MS, o lodo

secundário da estação de tratamento de efluentes, em uma caldeira de leito fluidizado de geração de vapor de alta pressão.

Enfatiza-se que o presente trabalho visa estudar uma alternativa técnica para diminuir a ocupação do aterro sanitário, pois o lodo secundário de efluente é a principal fonte de deposição no aterro industrial. Desse modo, neste trabalho foi avaliada a possibilidade de utilização do lodo secundário na caldeira de leito fluidizado, em substituição parcial ao combustível principal, que pode ser óleo combustível ou cavacos de eucaliptos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matéria Prima para a Produção de Celulose

No Brasil, a madeira utilizada como matéria prima para a produção de polpa celulósica provém, principalmente, de várias espécies arbóreas de *Eucalyptus* e *Pinus*. Essas espécies começaram a ser introduzidas no Brasil no último século, em decorrência da diminuição dos povoamentos das espécies nativas. Mas, foi somente com a lei dos Incentivos Fiscais, em 1966, que o plantio dessas espécies tomou impulso, formando maciços florestais para os mais diversos fins.

A escolha destas espécies para o plantio comercial foi baseada, principalmente, em seu rápido crescimento, aproximadamente três a quatro vezes mais rápido que em seus países de origem.

As primeiras espécies de *Eucalyptus* introduzidas no Brasil datam de 150 anos atrás. Porém, seu cultivo intensivo iniciou-se no estado de São Paulo a partir de 1904, para cobrir as necessidades de lenha da antiga Companhia Paulista de Estradas de Ferro, sendo seu chefe florestal o idealizador desse evento, que introduziu, entre 1904 e 1919, quase 220 espécies diferentes.

A introdução das espécies de *Pinus*, de procedência europeia, iniciou-se em 1936, através do Serviço Florestal do estado de São Paulo. Em 1947 foram importadas as primeiras sementes de *Pinus eliottii* dos Estados Unidos. Devido aos resultados promissores alcançados deu-se início a um grande plantio florestal.

Outras espécies utilizadas como fonte de matéria prima para a indústria de polpa celulósica, embora utilizadas em pequenas escalas, são o pinho-do-paraná e a gmelina.

Os materiais lignocelulósicos são compostos, basicamente, por celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e constituintes menores. A celulose, principal componente da parede celular da fibra, polissacarídeo de alta massa molar, que se apresenta como um polímero de cadeia linear, consistindo exclusivamente de unidades de β -D-glicopiranoses unidas por ligações do tipo (β 1-4). As hemiceluloses também são polissacarídeos, porém diferem da celulose por serem constituídas de vários tipos de unidades de açúcar, além de serem polímeros ramificados e de cadeia curta. A lignina é um polímero amorfo, de composição química complexa, que confere firmeza a rigidez ao conjunto de celulose. O conteúdo de extrativos é considerado um importante parâmetro para produção de celulose e

papel. Os extrativos incluem um elevado número de compostos, e muitos podem ser solúveis em água quente, álcool, benzeno e outros solventes. Eles pertencem a diferentes grupos químicos, como as resinas, os açúcares, os taninos, os ácidos graxos, entre outros, os quais causam problemas econômicos e técnicos nos processos de celulose e papel (GUTIÉRREZ, 2001). Os constituintes menores incluem componentes minerais na madeira é normalmente pequeno e pode incluir óxidos de cálcio, potássio, fósforo, magnésio, entre outros. Esses compostos possuem funções associadas ao sistema fisiológico, exercendo importante papel no metabolismo da planta (FENGEL e WENEGER, 1989).

2.2 Processos de Produção de Polpa Celulósica

Os processos de obtenção da polpa e do papel constituem de muitos estágios, além disso, os materiais fibrosos necessitam para sua fabricação de diferentes produtos químicos, uma grande quantidade de água e energia na forma de vapor, consumo de vários combustíveis e grande quantidade de energia elétrica (IPPCEU, 2001).

A madeira, utilizada como matéria prima, difere em propriedades físicas e químicas, podendo entrar no processo na forma de toras, sendo posteriormente transformado em cavacos a fim de aumentar sua superfície específica, etapa necessária para a sua conversão em polpa celulósica durante o processo de polpação. . A polpa celulósica é formada por matérias-primas fibrosas, as quais podem ser classificada em fibras curtas (0,5 a 1,5 mm) e fibras longas (2 a 5 mm) de acordo com a espécie florestal utilizada como matéria prima, e também pelo tipo de tratamento que a madeira foi submetida durante o processo de polpação química e/ou tratamento mecânico e branqueamento, e as características desejadas para o produto final.

O processo de polpação visa a separação das fibras da madeira mediante a utilização de produtos químicos ou processos mecânicos. Podem ser classificados de acordo com seus rendimentos de polpa, ou de acordo com os reagentes e pH utilizados (BRACELPA, 2005).

Os dois processos alcalinos na produção de pastas químicas são o processo soda e o processo Kraft. No processo soda o principal reagente é o hidróxido de sódio, enquanto no processo Kraft, além do hidróxido de sódio, utiliza-se o sulfeto de sódio. No Brasil 85% dos processos industriais de obtenção de pasta celulósica utilizam o processo Kraft, devido as suas vantagens em relação aos outros processos (UNEP, 2003).

2.3 Processo Industrial de Obtenção de Polpa Celulósica

Historicamente, o cozimento alcalino iniciou em 1854, através do processo soda. Em 1884, foi patenteado o processo Kraft que nada mais é do que a modificação do processo soda, utilizado comercialmente pela primeira vez em 1885 na Suécia, tomando impulso a partir de 1930 predominando no mercado até hoje.

A palavra “Kraft” é de origem sueca e alemã que significa “força” (resistência) (REEVE, 1996). O então processo Kraft, consiste em atuar sobre a madeira na forma de cavacos com a combinação de dois reagentes químicos, hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), obtendo como resultado a dissolução da lignina e a liberação das fibras. Essas fibras liberadas constituem a “polpa celulósica” marrom ou massa marrom (CARREIRO, 2009).

Usando a terminologia da indústria atual, o processo pode ser exemplificado simplesmente através da equação:

Madeira (fibras + ligninas) + licor branco (NaOH + Na₂S) = “celulose” + licor preto.

Na Figura 1, abaixo, está demonstrado o processo Kraft de uma forma completa, iniciando pelo cavaco da madeira, cozimento nos digestores, lavagem da polpa onde é extraído o licor negro e enviado para o processamento na evaporação, seu processamento na caldeira de recuperação como combustível, recuperação dos produtos químicos na forma de fundido (*Smelt*), caustificação onde se obtém novamente o licor de cozimento (hidróxido de sódio e sulfeto de sódio).

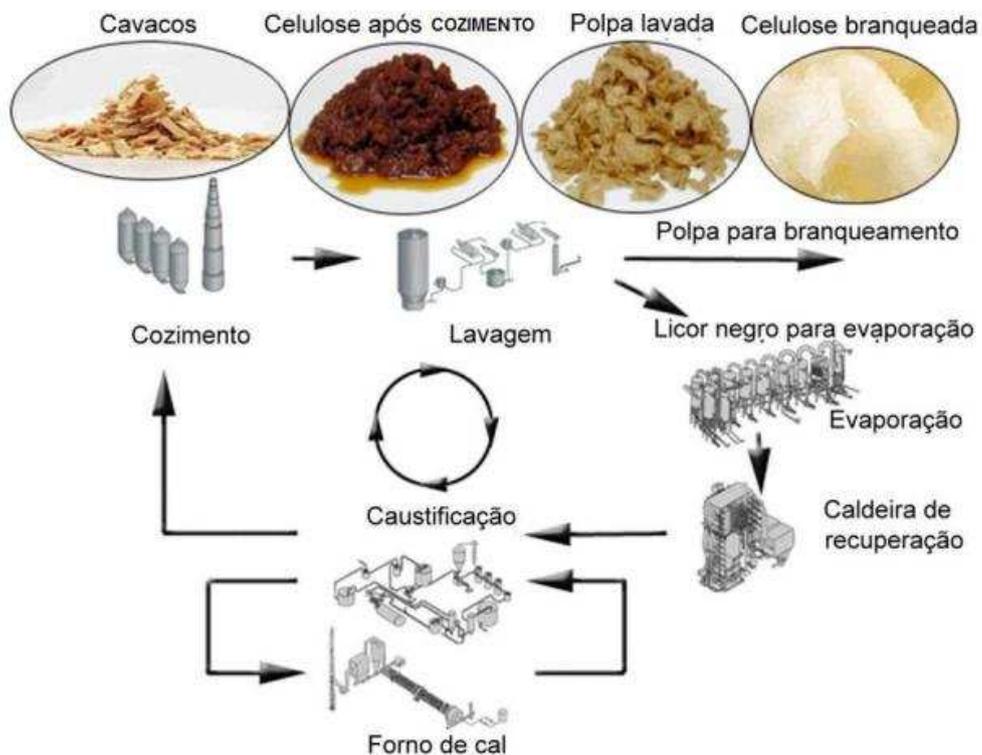


Figura 1-Fluxograma do processo Kraft.

Fonte: Morkfinesk (2005).

No processo de obtenção de celulose é gerado um subproduto denominado como “licor negro” ou “licor preto”, no qual contém a parte da madeira dissolvida (lignina), combinada com os reagentes químicos utilizados no início do processo de cozimento. Por razões ambientais e econômicas é absolutamente necessário seu reaproveitamento no processo que é denominado como “recuperação de produtos químicos”.

A grande importância do licor negro nesse processo é seu uso como fonte de energia (combustível) em caldeiras de recuperação, que funcionam como um reator, e na sua combustão, gera calor para geração de vapor e assim recuperando em forma de cinza fundida chamado de Smelt.

O processo Kraft tem como principal vantagem a recuperação dos produtos químicos adicionados a ele. Por outro lado, as desvantagens desse processo são:

- Alto custo de implantação;
- Odor dos gases oriundos do processo;
- Baixa alvura após cozimento relacionado a outros processos como sulfito, por exemplo;
- Alto custo no branqueamento.

Após a lavagem da massa marrom, ocorrem as etapas de pré-branqueamento e branqueamento, onde se faz uso de químicos como oxigênio, ozônio, peróxido de hidrogênio e dióxido de cloro para que se possa obter finalmente, a polpa celulósica branqueada.

2.3.1 Pátio de Madeira

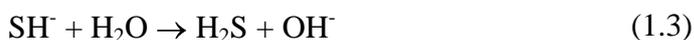
O setor de preparação de madeira recebe as toras de madeira. Uma das primeiras etapas do processamento da madeira na fábrica é processo de descascamento. Várias tecnologias de descascamento podem ser empregadas, sendo a mais utilizada a tecnologia dotambor rotativo descascador, onde, com a fricção entre as toras, ocorre o descascamento. As toras descascadas são então encaminhadas por meio de uma correia transportadora ao picador, que transforma as toras de madeira em cavacos, com dimensões especificadas necessárias para promover a adequada penetração de licor branco para impregnação dos cavacos no setor de polpação. Após a picagem, em processo contínuo, os cavacos são transportados por meio de correias para a peneiragem e posterior estocagem na pilha de cavacos, onde são estocados para que possam ser utilizados na alimentação do digestor utilizado processo de polpação.

2.3.2 Impregnação dos Cavacos

Os cavacos de madeira são alimentados do silo de estocagem para o processo, antes de irem para o digestor eles são aquecidos em um vaso de pressão, com o objetivo de retirar o ar do interior dos mesmos, e depois deste processo os cavacos sofrem a impregnação com o licor de cozimento. A impregnação consiste na penetração do licor na madeira para dissolver a lamela média, composta principalmente por lignina, que une as fibras entre si. Esta penetração pode ser feita por um gradiente de pressão hidrostática e/ou por difusão de íons ou outros solutos através da água, formando um gradiente de concentração (MACEDO, 2006).

2.3.3 Processo de Cozimento

O licor de cozimento ou licor branco é constituído de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio numa proporção de aproximadamente 5:1, respectivamente, apresentando um pH de 13 a 14. Outros íons podem estar presentes como carbonatos, sulfatos, sulfitos e tiosulfatos. As reações de hidrólise para o licor branco são mostradas pelas equações (1.1), (1.2) e (1.3).



Pode-se verificar que a hidroxila do hidróxido de sódio é o agente oxidante nas reações de deslignificação, porém não é um reagente seletivo. A hidroxila também degrada a celulose e as hemiceluloses. A adição de sulfeto de sódio, dissociado em água, libera íons hidrossulfetos, que será o agente potencializador, ou seja, um catalisador para a reação da lignina com hidroxila. Assim a preferência da hidroxila será a reação com a lignina, ao invés de degradar os outros componentes. Podemos dizer que o sulfeto de sódio é um produto que preserva as fibras durante o cozimento, mantendo a qualidade do comprimento das fibras (IPPCEU, 2001). Podemos definir Alcalí Ativo e Alcalí Efetivo como:

Alcalí Ativo – Inclui o hidróxido de sulfeto de sódio, expresso como Na_2O . O Alcali Ativo é geralmente expresso em porcentagem sobre o peso absolutamente seco da madeira empregada.

Alcalí Efetivo – Inclui $\text{NaOH} + 1/2 \text{Na}_2\text{S}$, expresso em Na_2O .

2.3.4 Processamento da Polpa Celulósica

O processo de cozimento pode ocorrer em digestores do tipo batelada ou em digestores contínuos, No processo em batelada, quando se processa o estágio de cozimento, o licor e os cavacos de madeira são carregados em um vaso de pressão onde são elevadas a temperatura e a pressão do vaso. Quando a concentração de lignina atacada alcança o número kappa desejado (Número kappa indica o grau de deslignificação da polpa), a mistura é descarregada para um tanque de estocagem sob pressão atmosférica, chamado de “blowtank”. Após este estágio é feita novamente à preparação para outro carregamento no vaso pressurizável.

No cozimento contínuo, os cavacos impregnados com licor branco entram num vaso cilíndrico em temperatura de 155 a 175 °C. Ao longo do digestor existem estágios de cozimento determinados pela temperatura da mistura. O tempo de cozimento na temperatura máxima está na faixa de 1 a 2 horas, mantendo um tempo total de passagem no digestor de cerca de 4 horas.

As operações subsequentes utilizadas no processamento de polpas celulósicas serão o processo de depuração, utilizado para remover as impurezas sólidas. E lavagem da polpa, que é a separação do líquido, composto pelas frações de lignina solubilizada no licor de cozimento, das fibras, e a lavagem desta última com água limpa.

2.3.5 Branqueamento de Polpas Celulósicas

O branqueamento pode ser definido como um tratamento químico que tem por objetivo melhorar as propriedades da pasta celulósica a ele submetida. O pré-branqueamento é utilizado para remoção de derivados de lignina ainda remanescentes na polpa, são aplicados reagentes que modificam quimicamente as substâncias coloridas, tornando as pastas mais claras, geralmente são usadas para este fim reagentes como gás oxigênio, soda caustica e peróxido de hidrogênio. Entretanto, o processo de purificação que visa a remoção de impurezas, tais como íons metálicos, resinas e grande parte da lignina residual, utilizando reagentes oxidantes seletivos que não degradam as fibras, é conhecido como branqueamento, tendo como reagentes utilizados o hipoclorito de sódio, gás cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, soda caustica e gás oxigênio (MACEDO, 2006).

2.3 Processos de Formação de Resíduos

Segundo a resolução do Conama nº 313/2002, o resíduo sólido industrial é aquele proveniente de atividades industriais e que se encontra nos estados sólido, semi-sólido e gasoso, cujas propriedades 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 alternativa tecnológica disponível.

A NBR 10.004 classifica os resíduos sólidos em função de suas propriedades físicas, químicas, infectocontagiosas e da concentração de contaminantes, conforme segue:

- Resíduo Classe I: Resíduos perigosos
- Resíduos Classe II: Resíduos não perigosos
 - IIA – não inertes
 - IIB – inertes

Os resíduos gerados na Fibria em Três Lagoas são classificados como Classe IIA. Esses resíduos podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Em virtude das suas características físico/química o lodo biológico é considerado IIA, portanto necessita de um tratamento adequado antes de ser disposto no seu destino final.

O processo de produção de celulose Kraft geram alguns resíduos que não são reaproveitados nos processos, sendo destinados na maioria das vezes em aterros industriais.

Segundo Celso Foelkel, lodo pode ser definido como materiais pastosos e úmidos, de aspecto homogêneo, coloração escura, odor característico, ricos em matéria orgânica e água e que são gerados em processos industriais de conversão na forma de resíduos sólidos.

- processo de branqueamento da polpa celulósica;
- processo de refinação das fibras para formação da folha de papel;
- próprio processo de formação da folha de papel e
- processo de produção das fibras derivadas de reciclagens.

No processo da fabricação da polpa celulósica, o efluente gerado é resultante de perdas de fibras degradadas que estão na forma de suspensão junto com a lignina que foi oxidada e solubilizada pela água de lavagem, esta água forma o efluente, podendo ser ácida ou alcalina de acordo com a sua origem. E é lançado diretamente para a estação de tratamento de efluentes. Infelizmente este descarte não pode ser reutilizado, devido a sua cor, excesso de fibras degradadas, DQO e DBO elevadas (REZENDE *et al.*, 2000).

É prudente afirmar que o resíduo presente no efluente de uma estação de tratamento da indústria de celulose e papel é constituído basicamente de celulose degradada, ou seja, fibras que sofreram uma redução do seu tamanho durante a oxidação química, durante a remoção da lignina e da refinação e desagregação mecânica (THOMPSON *et al.*, 2001).

2.3.1 Caracterização do Resíduo

A caracterização do resíduo secundário derivado dos efluentes dos processos de fabricação de polpa celulósica e papel baseia-se em ensaios realizados de acordo com a Norma NBR 10004. Este resíduo é descrito como Classe II – Resíduos Não Inertes, podendo ser acondicionados em tambores ou em caçambas e serem dispostos em aterro industrial, reciclado ou incinerado (ABNT, 2004). A Tabela 1 indica a composição elementar deste resíduo.

Tabela 1- Composição Elementar do Resíduo Secundário da Fabricação de Papel e Celulose.

Componentes	Resíduo
Carbono (%)	13,39
Hidrogênio (%)	2,14
Nitrogênio (%)	0,21
Oxigênio (%)	17,50
Enxofre (%)	0,05
Cloro (%)	0,005
Cinzas (%)	8,14
Umidade (%)	59,02
Poder calorífico superior (KJ/kg)	3880

Os lodos das fábricas de celulose e papel são basicamente constituídos em sua fase sólida de:

- Fibras e fibrilas de material celulósico;
- Cargas minerais da fabricação do papel;
- Terra e areia que existem como contaminantes nas fábricas junto às toras de madeira, lavagens de pisos, etc.
- Floculantes utilizados no tratamento de águas e efluentes;
- Teores de elementos minerais processuais e iônicos adsorvidos na matéria orgânica dos lodos ou presentes dissolvidos nos próprios efluentes que acompanham os lodos: cloretos, sílica, sódio, cálcio, sulfatos, carbonatos, etc.;
- Organismos biologicamente ativos ou já mortos, presentes como material orgânico residual. Dentre esses microrganismos temos bactérias, fungos, anelídeos, rotíferos, algas, helmintos, etc.
- Micro-poluentes orgânicos e minerais; metais pesados, tolueno, ácidos resínicos, organoclorados, dioxinas e furanos, etc.;
- Frações oligoméricas de polímeros da madeira: lignina, carboidratos, extrativos, etc.

2.4 Tipos de Resíduos

A produção de celulose gera vários tipos de resíduos orgânicos e inorgânicos. O preparo de madeira dá origem às cascas, enquanto o tratamento de águas residuárias gera lodo com fibras, lodo biológico e uma fração inorgânica removida na decantação primária (PIOTTO, 2003).

2.4.1 Lodo Biológico

Diversas etapas de fabricação no processo industrial acabam se contaminando com sais minerais, terra, areia, compostos orgânicos, óleos e graxas, diversos tipos de sólidos que ficam nela suspensos, etc. A conhecida poluição hídrica dos efluentes exige tratamento final para que o efluente a ser retornado ao corpo de água possa ter características compatíveis para ser recebido de volta. Sólidos suspensos acabam sendo separados por gradeamento, peneiramento ou decantação; enquanto a matéria orgânica dissolvida precisa ser convertida em uma fase sólida capaz de ser removida por decantação, filtração, flotação, centrifugação ou outra forma eficiente de separação das fases sólidas e líquidas. A maneira mais comum de se tratar a poluição orgânica é através de tratamentos biológicos, onde microrganismos especializados àqueles tipos de compostos orgânicos presentes nos efluentes, alimentam-se dos mesmos. Com isso, esses organismos obtêm energia metabólica e fixam o carbono da poluição orgânica em seus próprios corpos, formando suas células. Quando essa população microbiológica alcança um certo nível de crescimento em tamanho e número de indivíduos, esses microrganismos são separados na forma de lodos biológicos. Esse tipo de lodo é outro lodo nas indústrias e muitas vezes referido como Lodo Secundário Biológico (FOELKEL, 2010). A Figura 2, abaixo, apresenta imagens de lodos biológicos da indústria de celulose.



Figura 2- Lodos Biológicos.

Fonte: Foelkel, 2010.

Lodo Biológico

2.4.2 Lodo Primário

Nas fábricas integradas de celulose e papel o lodo primário produzido na etapa primária do tratamento é bastante rico em sólidos, impurezas minerais com muita umidade, que são resultantes da separação ou perdas de cargas minerais utilizadas na fabricação (PIOTTO, 2003). A Figura 3 apresenta imagens da disposição de lodos secundários da indústria de celulose.



Fibras, rejeitos
Lodo Primário

Figura 3-Lodos Primário.

Fonte: Foelkel, 2010.

2.5 Processo de Queima em Caldeiras de Biomassa

O processo de combustão da biomassa sólida em caldeira consiste em quatro fases distintas, mas podem acontecer simultaneamente em diferentes regiões da biomassa em reação.

1. **Aquecimento e Secagem:** é o processo de retirada da umidade contida no combustível sólido pela adição de calor, que provoca a evaporação da água.
2. **Pirólise:** Após a secagem do combustível sólido, se sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Esta fase também é denominada de volatilização.
3. **Combustão:** Nesta fase, os gases formados no processo de pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica, tendo como produtos dióxido de carbono, água e calor ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$).
4. **Pós-Combustão:** Ao final da pirólise, a biomassa tornou-se uma massa sólida composta de carvão e cinza. As partículas de menores dimensões são arrastadas pelos gases e saem pela chaminé com a denominação de particulados. Uma fração do carbono e cinza consegue gaseificar e entra no escoamento na forma de CO , CH_4 e H_2 e outros gases. O restante do carvão e das cinzas é removido da câmara de combustão na forma de resíduos.

A Figura 4 apresenta o diagrama de processo de combustão da biomassa sólida em caldeira, nas suas quatro fases distintas.

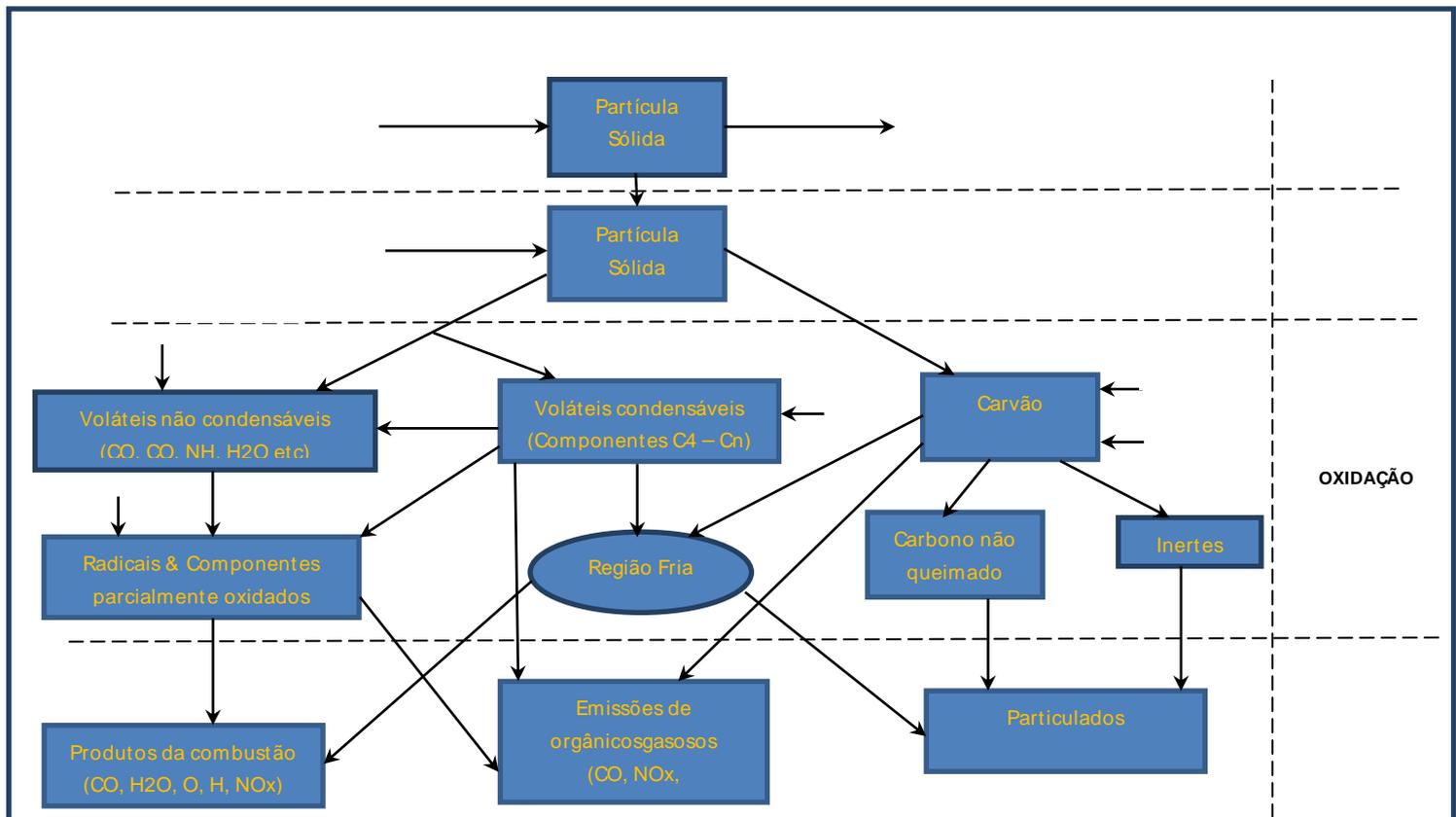


Figura 4- Diagrama do processo de combustão de sólidos.
 Fonte: NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008.

Combustão de biomassa em leito fluidizado tem sido largamente utilizada devido à sua característica de poder operar com combustível com umidade elevada (até 65% de umidade). Para formar a base de suporte de um leito fluidizado, normalmente se utiliza areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade, por períodos relativamente longos, no combustível alimentado, ao contrário de caldeiras de grelha.

2.7 Descrição da Caldeira de Leito Fluidizado Circulante

A caldeira de força projetada tem capacidade de geração de vapor de 33,3 kg/s (120 t/h): a 86 bar(g), 487 °C e à partir de água de alimentação a 120 °C. Utiliza-se gás natural, óleo combustível pesado ou óleo combustível leve (diesel) como combustível de partida. Também, óleo combustível pesado ou o óleo combustível leve (diesel) é usado como combustível auxiliar.

A mistura de combustível sólido de projeto para combustão no leito fluidizado de borbulhamento (BFB) é uma mistura de casca de eucalipto, rejeitos de triagem e resíduos de madeira.

Os valores das principais dimensões da caldeira são os seguintes:

- Capacidade máxima contínua com a mistura de combustível sólido do projeto: 33,3 kg/s [LHV=6830 kJ/kg (úmido), teor de umidade $w=51,0$ peso-%, teor de cinzas 4,62 peso-% (seco)];
- Queima máxima de óleo combustível pesado, aproximada 22,2 kg/s;
- Efeito de queima de óleo do queimador principal 68 MW combustível geração de vapor máxima para água e vapor 36,7 kg/s;
- Pressão do vapor na válvula de retenção de vapor principal da caldeira: 85 bar;
- Temperatura do vapor depois da caldeira: 487 °C;
- Temperatura da água de alimentação no tanque de água de alimentação, média: 120 °C;
- Temperatura da água de alimentação antes da caldeira (com carga MCR – Capacidade Máxima Contínua): 184 °C.

O tipo de caldeira da Metso Power é a caldeira com leito fluidizado de borbulhamento (HYBEX) com uma unidade de tambor único composta por um forno de construção com paredes de membrana estanque a gás. Superaquecedores secundários, terciários e secundários ficam localizados na parte superior do forno. O banco da caldeira, o economizador de superfície estendida do tipo horizontal e os pré-aquecedores de ar do gás de combustão ficam localizados no segundo e terceiro estágios.

A caldeira é equipada com dois queimadores piloto com queima de gás natural, óleo combustível pesado e leve (cada um com 17 MW com gás natural, 10 MW com óleo), dois queimadores principais com queima a gás (cada um com 34 MW) e queimador CNCG.

A mistura de combustível sólido é conduzida ao leito fluidizado com o uso de duas linhas de alimentação. As duas linhas de combustível são compostas por um silo de combustível com extrator de silo, um transportador de arraste de correia, um silo pequeno de ajuste de combustível, duas roscas de alimentação e duas calhas para combustível com dois alimentadores rotativos como proteção de contrafluxo.

O material grosso proveniente do fundo do forno é removido através de quatro tremonhas e calhas a partir de diversas partes da grelha (HYBEX®) e é transferido com duas

roscas resfriadas por água para os transportadores de arraste de correia semi-resfriados por água e, por último, para o container de cinzas pesadas.

O ar de combustão é aquecido através dos pré-aquecedores de ar de água de alimentação de baixa pressão e dos pré-aquecedores de ar do gás de combustão. O ar de combustão é transferido para o forno através do ventilador de ar primário (fluidizado) e secundário.

As cinzas em suspensão provenientes das tremonhas do segundo e terceiro estágios e do ESP (Precipitador Eletrostático) são transferidas pneumaticamente para o silo de cinzas em suspensão.

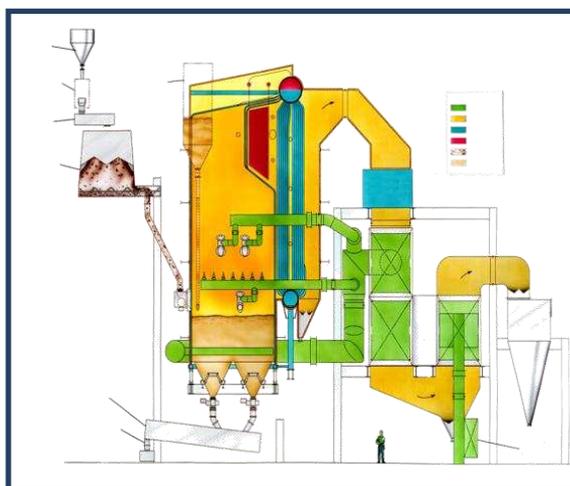
O sistema separado de água para resfriamento circulado é utilizado nas roscas e no transportador de cinzas pesadas. A água de reposição adicional é tirada da Instalação de Tratamento de Água Desmineralizada. A temperatura da água de resfriamento para os transportadores de cinzas é controlada com a água da fábrica no trocador de calor água-água.

Os gases de combustão são levados após a caldeira para o precipitador eletrostático. Um ventilador de tiragem forçada tipo radial fornece a corrente de ar necessária para transferir o gás de combustão do forno para a chaminé. Se necessário, o gás de combustão é circulado novamente após os ventiladores I.D. por um ventilador de recirculação de gás de combustão para o fundo do forno para controlar a temperatura do leito através da redução do teor de oxigênio no leito.

A Figura 5– Desenho Esquemático da Caldeira de Força de Leito Fluidizado da FIBRIA – MS

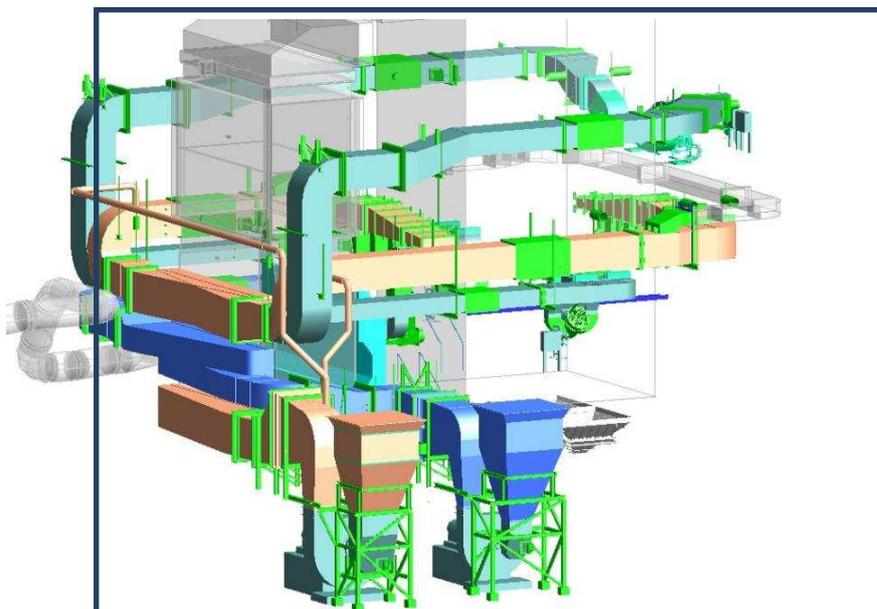
Dados: Geração de vapor – 120 ton/h / 86 bar de pressão / 487°C de temperature

Combustíveis – Biomassa/ óleo Combustível e possivelmente Biomassa + Lodo Biológico.



Desenho
esquemático da
caldeira de força
de leito
Fluidizado

A Figura 6 - Desenho da Caldeira de Força de leito fluidizado da FIBRIA - MS



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estudo de caso

Na Fibria-MS, todo o lodo biológico gerado na estação de tratamento de efluentes é encaminhado para o aterro industrial. A disposição é feita em caçambas e o transporte é efetuado por meio de caminhões. O aterro tem uma vida útil pequena com custos de construção de novas áreas de deposição, bem como custos de manuseio e manutenção.

No intuito da utilização da estação de tratamento de efluente (lodo biológico) em caldeira de leito fluidizado foi, inicialmente, realizada a caracterização química, e poder calorífico do resíduo secundário gerado na fábrica Fibria-MS.

3.2 Métodos

Inicialmente serão apresentadas as instalações experimentais utilizadas nesta pesquisa para o tratamento de lodo secundário oriundo da fábrica de papel e celulose Fibria-MS, bem como seu desempenho, com o objetivo de avaliar o potencial da queima em caldeira de recuperação de biomassa (caldeira de leito fluidizado) e substituição, ou auxílio, ao processo de compostagem.

3.2.1 Diagrama de Blocos e Balanço de Massa simplificado

Segue na Figura 6 o diagrama de blocos e balanço de massa simplificado do processo de queima da mistura de lodo e biomassa durante o período de teste.

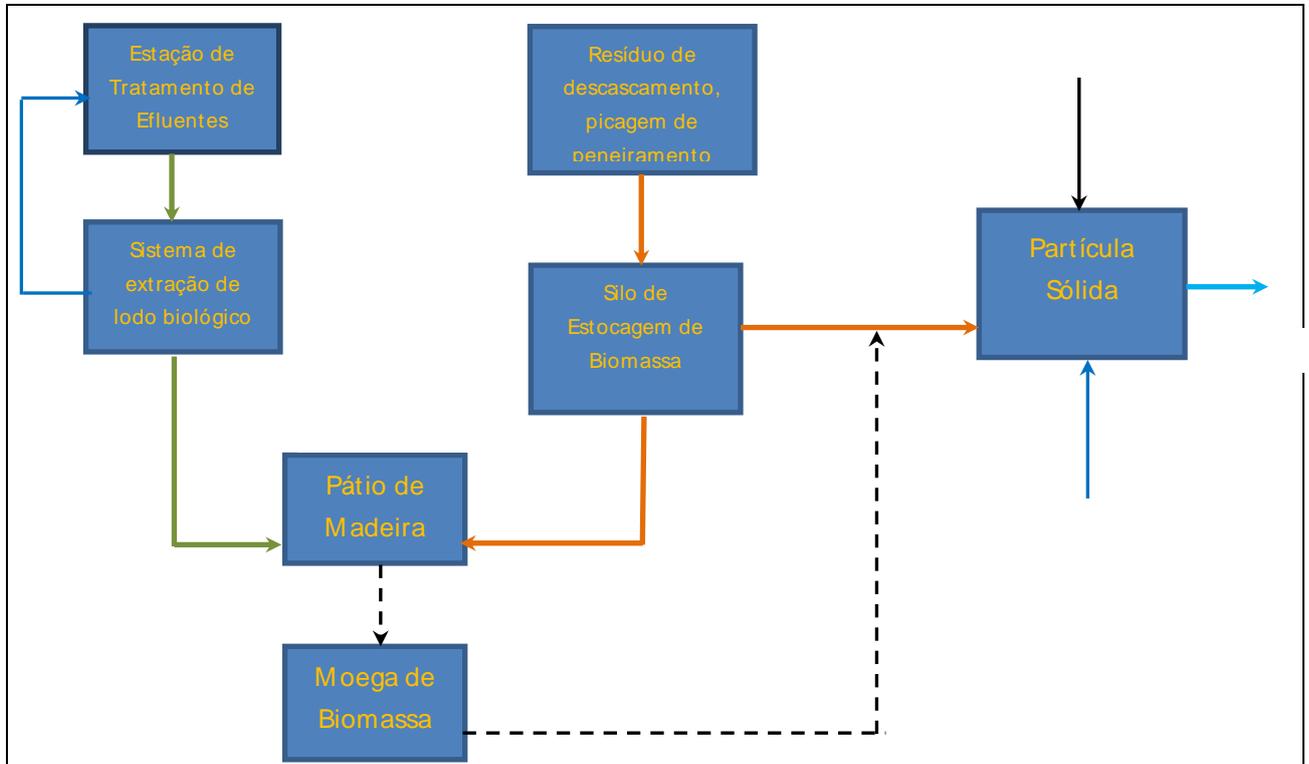


Figura 6- Diagrama de blocos e balanço de massa simplificado.

No diagrama estão demonstradas as principais correntes alimentadas na Caldeira de Força.

- (1) **Lodo Biológico:** resíduo do processo de tratamento do efluente por lodo ativado. É extraído dos decantadores secundários e enviado para um tanque adensador para controle da consistência. O lodo adensado é desaguado em centrífugas antes do descarte.
- (2) **Biomassa:** resíduo do processo de descascamento e picagem das toras e peneiramento dos cavacos. É formado por casca e resíduos de madeira e pode ser estocada no Silo de Biomassa.
- (3) **Mistura 1 (biomassa + lodo):** para possibilitar uma melhor homogeneização do lodo e otimizar seu transporte para a queima na Caldeira, ele será misturado com a biomassa.
- (4) **Biomassa do Silo de Estocagem:** para suprir a quantidade de combustível necessária para uma queima regular na Caldeira de Força e com isso o controle da geração de vapor, será alimentada uma quantidade de biomassa para atender essa demanda, caso a mistura não seja suficiente para o controle da queima.

(5) *Mistura 2 (mistura 1 + biomassa do silo)*

(6) *Combustíveis Auxiliares*: como detalhado no descritivo da Caldeira de Força alguns combustíveis auxiliares podem ser queimados como: Óleo 3ª, Gás Natural e Metanol (backup do Forno de Cal).

(7) *Água de Alimentação*

(8) *Vapor*

3.2.2 Descrição do método

Foi utilizado lodo biológico oriundo da indústria Fibria, localizada na cidade de Três Lagoas-MS. A queima ocorreu utilizando uma mistura de lodo biológico, biomassas picada pela Fibralogic e finos (rejeitos da peneira) com a finalidade de melhorar a combustão e gerar mais energia térmica.

A mistura precisava ser a mais uniforme possível em suas características fundamentais, como teores de umidade e cinzas. Isso porque a queima de lodos muito ricos em cinzas irá gerar baixa energia térmica e problemas de incrustações nas caldeiras, só sendo recomendável quando a empresa for obrigada pelo legislador/controlador ambiental, ou quando quiser eliminar o lodo para evitar aterrál-lo. Caso contrário, é tecnicamente desaconselhado.

3.2.3 Descrição do Processo da Mistura

Para o processo de mistura foram utilizados os seguintes equipamentos: compostadeira, trator com super redutor, pá carregadeira e caminhão basculante.

A mistura foi preparada em um pátio de mistura instalado provisoriamente ao lado do aterro industrial para possibilitar o manuseio do material eliminando o impacto ambiental.

Para facilitar a pré-mistura com a pá carregadeira os resíduos (lodo e biomassa) foram descarregados na forma indicada na Figura 7.

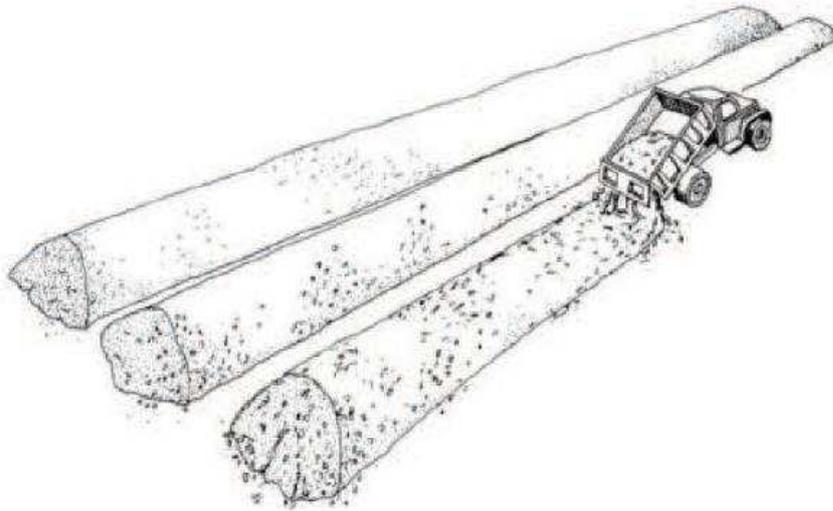


Figura 7- Ilustração do processo de mistura de lodo e biomassa.

A pré-mistura foi realizada com a pá-carregadeira e apresentou-se a mais homogênea possível. A pré-mistura não foi realizada em ocasião de chuva, para não incorporar umidade ao material.

Depois de realizada a pré-mistura o material foi disposto em forma de leiras para ser misturado com a compostadeira.

As leiras apresentaram-se de forma triangular com uma altura máxima de 1,30 metros, uma base de 3 metros. O comprimento foi determinado pela área disponível para movimentação de máquinas. Entre as leiras houve uma distância de 2 metros.

Cada leira foi revolvida duas vezes com a compostadeira. As leiras não foram revolvidas quando estava chovendo.

O material foi destinado da seguinte forma para ser utilizado na leira:

- **O material revolvido no 1º dia** de trabalho foi deixado 15 dias enleirado antes de destinar para a caldeira.
- **O material revolvido no 2º dia** de trabalho foi deixado 7 dias enleirado antes de destinar para a caldeira.
- **O material revolvido no 3º dia** de trabalho foi destinado imediatamente para ser utilizado na caldeira.

3.2.4 Descritivo do Teste

O teste de queima da mistura de biomassa e lodo biológico teve uma duração de 08 dias.

O lodo biológico removido da Estação de Tratamento de Efluentes e a biomassa proveniente do processo de preparo de cavacos foram transportados para o local apropriado para o processo de mistura.

O material misturado foi alimentado à moega (equipamento independente do sistema de extração de biomassa do silo de estocagem) e foi transportado juntamente com a biomassa proveniente do silo para ser queimada na caldeira de força.

Nos dias de queima foi fixada a extração de biomassa e adicionado mistura biomassa + lodo para alimentação da Caldeira. Nesses dias não foi utilizado óleo ou gás natural complementares.

O objetivo principal foi avaliar o impacto da mistura nas variáveis de operação da Caldeira de Força e na emissão dos componentes monitorados nos gases na chaminé da Caldeira de Força (TRS e material particulado). Amostras serão coletadas para análise de outros compostos conforme CONAMA n° 316 (Anexo 1).

A caldeira de força com tecnologia de leito fluidizado é um equipamento que possui a melhor tecnologia disponível para queima de biomassa e por trabalhar com alta temperatura de combustão (> 800°C), mostra ser o equipamento adequado para queima de lodo biológico respeitando os limites de emissões.

O resíduo sólido da queima da mistura de biomassa e lodo biológico que é coletado no sistema de descarte de cinzas da Caldeira de Força foi destinado ao aterro industrial.

Como o processo de mistura do lodo biológico com a biomassa foi realizado ao lado do aterro industrial o efluente líquido gerado, foi coletado juntamente com o chorume do aterro e bombeado para a Estação de Tratamento de Efluentes.

3.3 Análises realizadas

3.3.1 Plano de Amostragem

Para o período de teste com a queima de lodo biológico na caldeira, e um período de referência (controle), no qual não houve queima de lodo na caldeira, foram realizadas amostragens dos gases e do resíduo de queima (cinzas) para atender o artigo 38 da resolução 316 do CONAMA (Anexo 1). As amostras de gases foram coletadas na chaminé da Caldeira de Força e o material inorgânico da cinza descartada do precipitadoreleostático.

Todas as amostras foram inicialmente caracterizadas quanto ao teor de umidade e as demais análises realizadas em base seca. As amostras foram secas em estufas a 105 °C durante um período de 24 horas.

As análises referentes à determinação do teor de matéria volátil e do teor de cinzas foram realizadas no Laboratório Externo (IPT-SP), tomando como referência os procedimentos contidos nas normas ABNT/NBR 8290, ABNT/NBR 8289, ABNT/NBR 8299, respectivamente.

As análises dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (CHN e S) foram realizadas pelo equipamento Perkin-Elmer, com o método baseado na oxidação completa da amostra (combustão) e análise dos gases liberados.

Calculou-se o valor do poder calorífico superior e inferior (PCS e PCI respectivamente) das amostras usando-se os valores obtidos da análise de carbono e hidrogênio, com os valores de ROSE e COOPER (1977) para o poder calorífico desses elementos. As equações utilizadas foram:

$$PCS = \%C \times PCS_{\text{carbono}} + \%H \times PCS_{\text{hidrogênio}}$$

$$PCI = \%C \times PCI_{\text{carbono}} + \%H \times PCI_{\text{hidrogênio}}$$

Onde:

PCS: Poder calorífico superior (MJ/kg);

PCI: Poder calorífico inferior (MJ/kg);

%C: Teor de carbono na amostra expresso em porcentagem (%);

%H: Teor de hidrogênio na amostra expresso em porcentagem (%).

Ainda, outras variáveis de processo foram analisadas, a fim de verificar a viabilidade de queima de lodo na caldeira. Desse modo, a Tabela 2 sumariza todas as variáveis avaliadas no estudo, bem como apresenta como foi realizada a análise: resultado por análise em laboratório, ou por aquisição do resultado em equipamento com medidor online.

Tabela 2- Análises realizadas.

Variável	Modo de análise
Teor umidade	Norma NBR 8293
Poder calorífico tal qual	Norma American Society for Testing Materials - ASTM D-2015-66
Poder calorífico seco	
TRS	TAPPI T 406 om-08
Material particulado	Métodogravimétrico
Produção de vapor	Online
Ar primário	Online
Pressao fluido	Online
Vazao fluido	Online
Vazao ar secundário	Online
Ar recirculado	Online
Temperatura do leito	Online

3.3.2 Análise Estatística

Todos os dados obtidos foram tratados no Microsoft Excel.

Para as variáveis, teor seco e poder calorífico, foram utilizadas seis observações em cada período (controle e teste lodo). Já para as demais variáveis, medidas online, foram utilizadas sessenta e quatro observações em cada período (controle e teste lodo).

Foram construídos intervalos de confiança para as médias dos dois períodos (controle e teste lodo) ao nível de confiança de 95%. Para comparar as médias dos dois períodos para as várias variáveis avaliadas foi utilizado o teste t de Student, com nível de significância de 5%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do resíduo

A Tabela 3 apresenta a caracterização química e poder calorífico do lodo secundário gerado na fábrica Fibria-MS. Tal caracterização fundamenta-se na proposição de que a combustão de lodos constitui-se em uma prática comum de gestão de resíduos sólidos industriais e municipais, que tem como finalidade principal reduzir o volume desses lixos e

resíduos. Uma segunda e importante missão é aproveitar algum calor útil dos lodos, já que eles contêm na maioria das vezes significativos teores de carbono orgânico. A queima desse lodo elimina a matéria orgânica e a umidade, deixando apenas a cinza como resíduo, com algum teor de umidade e carbono residual não queimado.

Tabela 3-Composição Química e Poder Calorífico Superior do resíduo secundário.

Composição Química	
C, % massa	48,3
H, % massa	5,5
S, % massa	0,05
O, % massa	45,9
N, % massa	0,28
Cinzas, % massa	8,6
Cl, % massa	<0,16
Poder Calorífico Superior	
PCS peso, MJ/kg	17,0

Como observado na Tabela 3, o resíduo (lodo secundário) utilizado nesse estudo apresenta uma constituição orgânica superior à 50%, fato que demonstra interessante potencial combustível a ser aproveitado. Entretanto, deve-se atentar ao teor de umidade desse material, o que pode inclusive levar a valores negativos de poder calorífico. Isso ocorre quando se necessita de mais energia do que o lodo possui para se promover a secagem e incineração completa do mesmo.

4.2 Teste de queima do lodo em caldeira de leito fluidizado

A seguir são apresentados graficamente os dados da avaliação do potencial de queima de lodo biológico em caldeira de leito fluidizado. Os valores apresentados correspondem à coleta de dados em dois períodos distintos, onde na primeira houve apenas queima de biomassa na caldeira (controle). Já no segundo período houve queima da mistura de biomassa e lodo biológico (teste lodo), na caldeira de leito fluidizado. Inicialmente foram construídos gráficos representando o intervalo de confiança e, posteriormente, foi testada a igualdade de medias, pelo teste t, em nível de 5% de significância. Todos os valores na íntegra, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, constituintes dos Anexos 2 e 3.

4.2.1 Teor de Umidade

Como observado, Figura 8, o valor médio do teor seco para a amostra no período de teste com lodo foi inferior ao valor da amostra no período controle, a queima de biomassa pura chamamos de “controle” e a queima de biomassa + lodo biológico chamamos de período de teste. Os dados foram avaliados pelo intervalo de confiança e, posteriormente, a igualdade de médias testada estatisticamente através do teste t, com nível de significância de 5%. Estatisticamente, foi observado que as médias diferem significativamente ($P < 0,05$), havendo uma redução percentual de 23,7%, passando o valor de teor seco de 65,7 para 50,1%. Tal redução do teor seco, ou aumento da umidade da amostra, pode impactar negativamente para o poder calorífico da amostra. Para diminuir o teor de umidade do lodo é possível deixá-lo mais tempo exposto para secagem ou secarmos com secadoras apropriadas disponível no mercado.

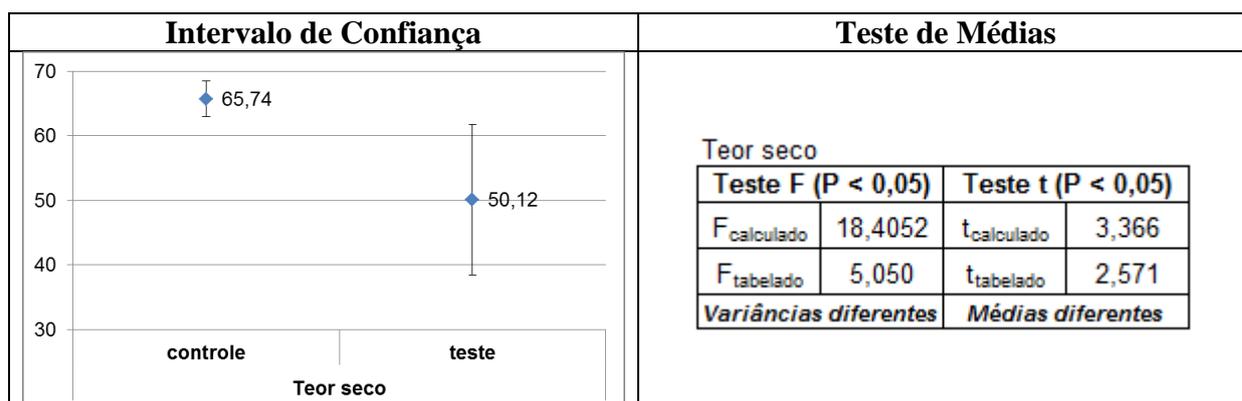


Figura 8-Intervalo de confiança para o teor seco (%), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

4.2.2 Poder calorífico

O poder calorífico pode ser definido pela quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume, no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível.

Seguindo a redução do teor seco, foi verificada uma redução do valor médio do poder calorífico para a amostra no período de teste com o lodo biológico, quando a análise foi realizada na amostra tal qual (Figura 9). Desse modo, as médias difeririam estatisticamente pelo teste t, em nível de significância de 5%.

Por outro lado, quando foi medido o poder calorífico para a amostra seca (Figura 10), não foi verificada diferença para as médias das amostras dos períodos distintos, de acordo

com teste t com nível de significância de 5%. Nesse caso aceita-se a hipótese de igualdade de médias. Através dessa análise foi verificado o poder calorífico do lodo biológico, excluindo a interferência da variação do teor seco da amostra. Este resultado mostra o potencial de utilização do lodo biológico na caldeira de leite fluidizado, atentando ao pré-condicionamento da amostra, de forma a reduzir a umidade e, conseqüentemente, aumentar o teor seco.

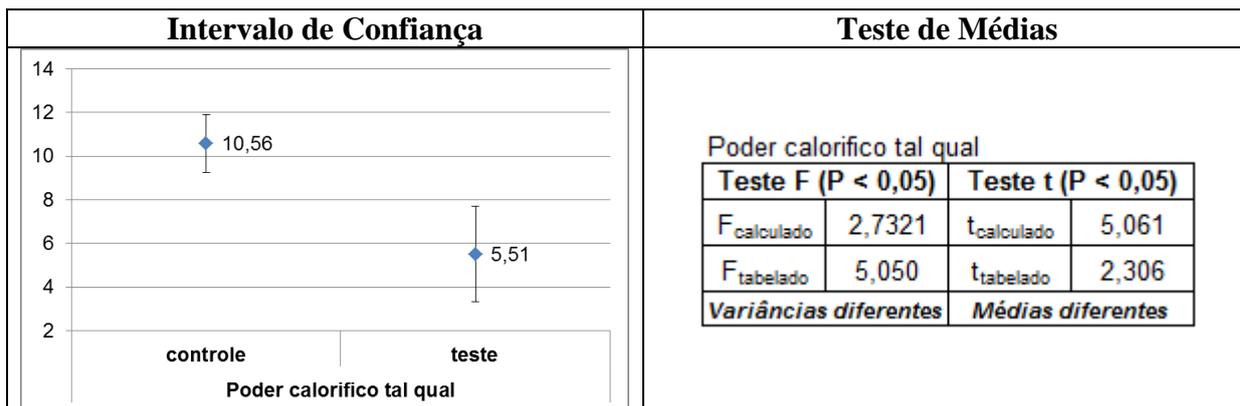


Figura 9-Intervalo de confiança para o poder calorífico tal qual (MJ/kg), das amostras queimadas na caldeira de leite fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

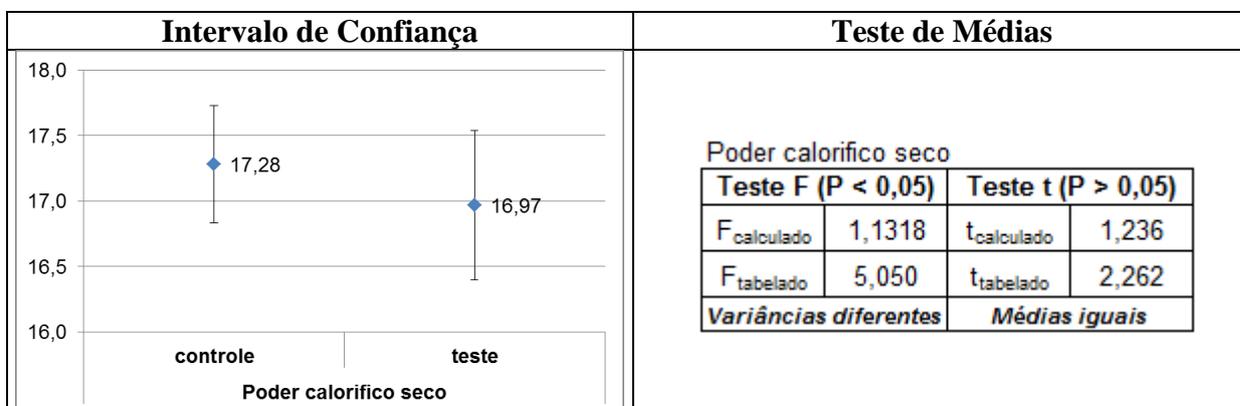


Figura 10-Intervalo de confiança para o poder calorífico seco (MJ/kg), das amostras queimadas na caldeira de leite fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

4.2.3 Produção de vapor

Durante o período de teste de queima do lodo biológico na caldeira de leite fluidizado não houve efeito negativo na produção de vapor pela caldeira. O valor médio da produção de vapor passou de 89,14 t/h no período controle para 95,23 t/h no período de teste com lodo (Figura 11), havendo diferença entre os valores médios, de acordo com o teste t com nível de

significância de 5%. Destacamos como ponto positivo, não termos nenhuma variação brusca nos dados da caldeira de força e variação brusca do TRS.

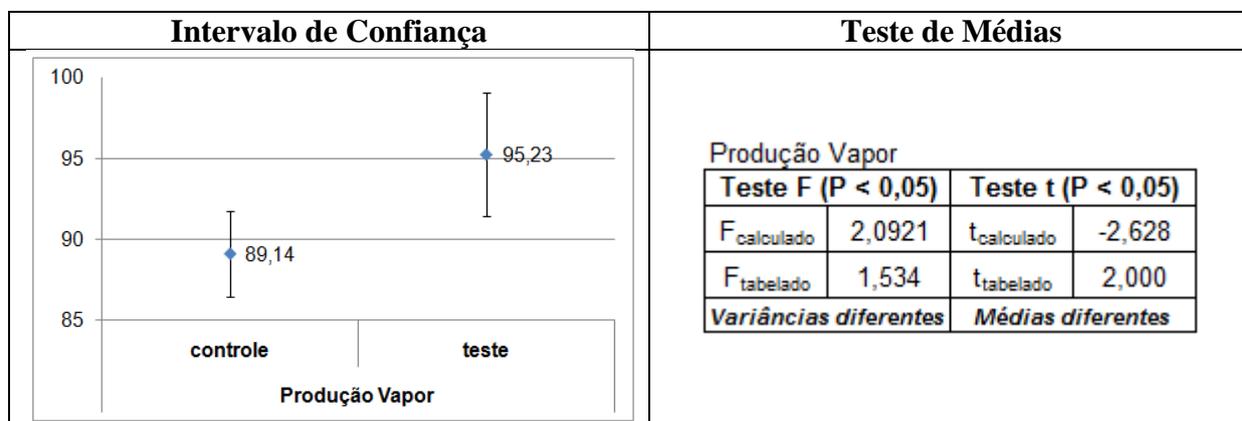


Figura 11-Intervalo de confiança para a produção de vapor (t/h), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

4.2.4 Ar primário e ar recirculado

Na Figura 12 podem ser observadas as vazões de ar primário e ar secundário na caldeira de leito fluidizado, para os períodos controle e de teste com lodo biológico. Conforme observado, a queima de lodo proporcionou uma inversão dos valores de vazão, de modo que reduziu a vazão de ar recirculado e aumentou a vazão de ar primário. A diferença das médias para as variáveis foi confirmada pelo teste t, com nível de significância de 95, Figuras 13 e 14. Quando queimamos biomassa pura os gráficos nos mostraram uma vazão de ar primário menor que a vazão de ar recirculado, quando queimamos biomassa + lodo biológico estas vazões se inverteram pois o ventilador de ar recirculado foi forçadamente aumentado a rotação para ganharmos vazão.

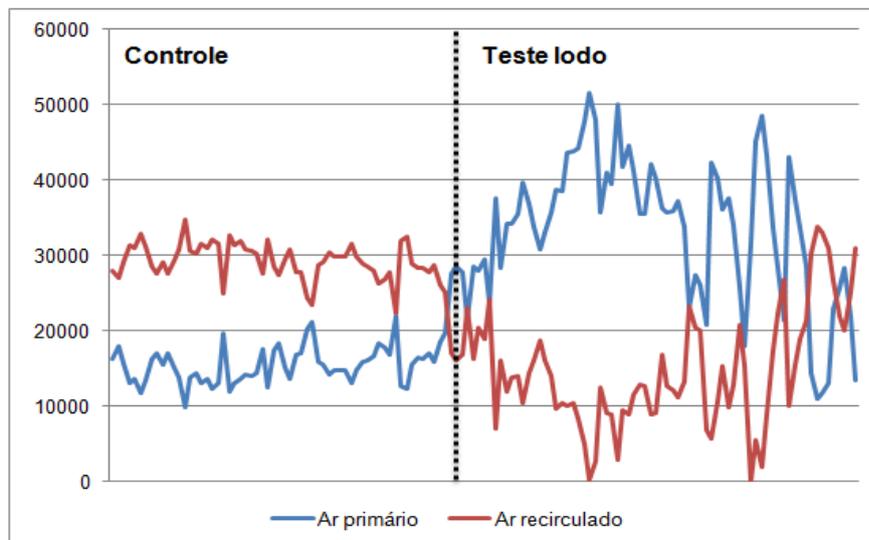


Figura 12-Perfil de vazão de ar primário e ar recirculado (m^3/h) na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e de teste com lodo biológico.

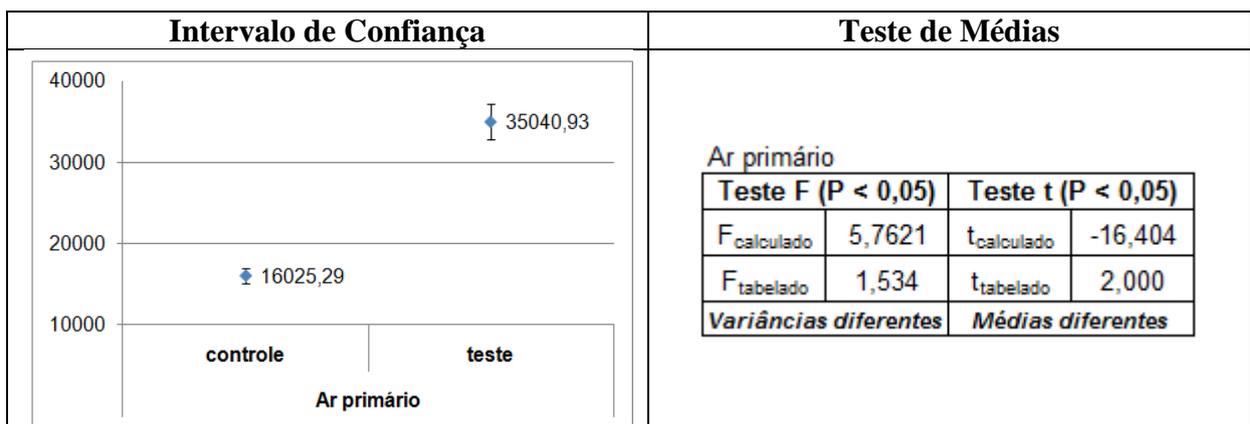


Figura 13-Intervalo de confiança para o ar primário (m^3/h), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

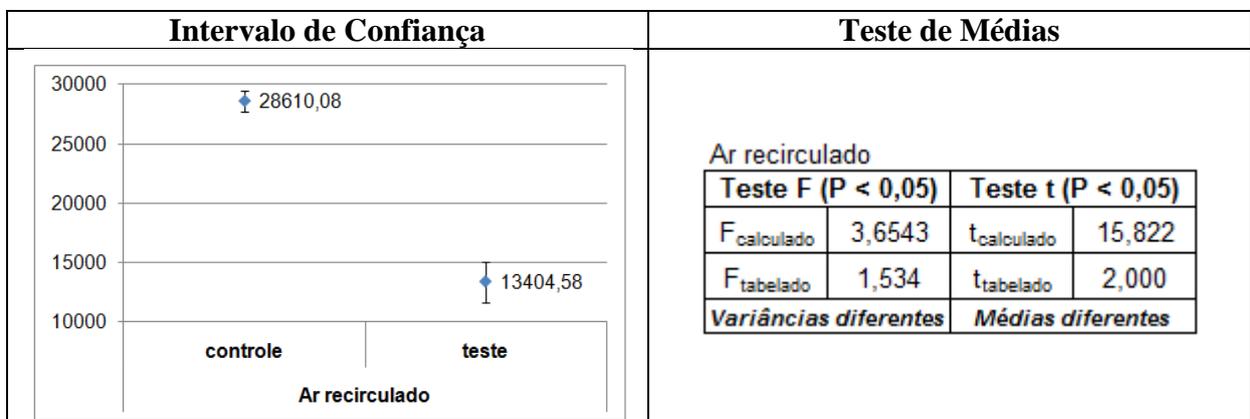


Figura 14-Intervalo de confiança para o ar recirculado (m^3/h), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

4.2.5 Temperatura do leito

Com relação a variável temperatura do leito, na caldeira de leito fluidizado, as médias não diferiram significativamente ($P > 0,05$), para os distintos períodos, tanto quando houve a queima somente com biomassa, quanto para o período quanto houve queima com lodo biológico, sendo os valores médios equivalentes a 846,01 e 847,54°C, respectivamente (Figura 15). Foi observada maior variabilidade (desvio padrão de 57,85 °C) dos dados para o período teste, ou seja, com a queima do lodo, conforme apresentado na Figura 16. Foi percebida uma instabilidade de controle de temperatura do leito quando foi procedida queima de lodo na caldeira. Desse modo, faz-se necessário uma intensificação do controle de processo (através de malhas de controle, por exemplo), de forma a reduzir tal variabilidade, estabilizando o controle de temperatura do leito. Para explicarmos tal fato sabemos que a vazão de ar recirculado tem como função manter a temperatura no leito fluidizado, quando queimamos biomassa + lodo biológico temos uma aumento da vazão de ar recirculado (conforme relatado no item anterior) para estabilizar a temperatura do leito.

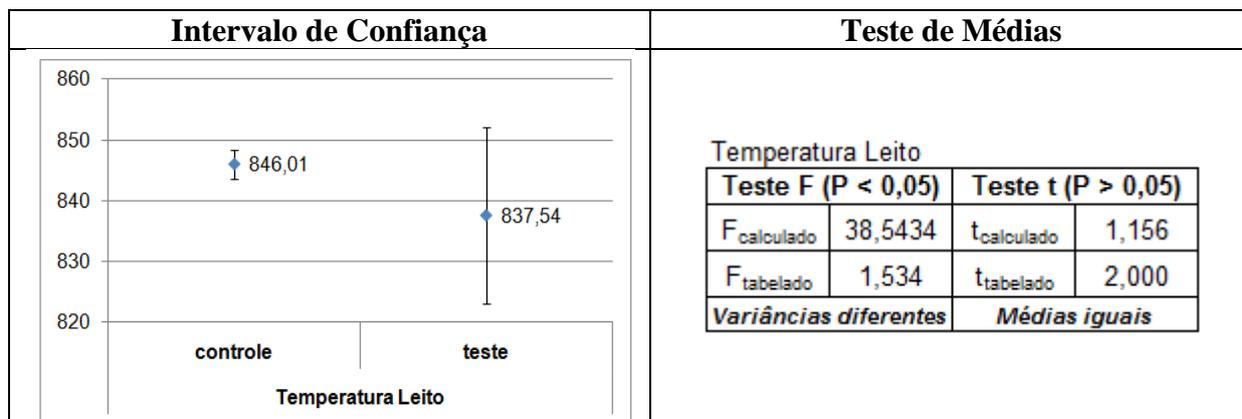


Figura 15-Intervalo de confiança para a temperatura (°C), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

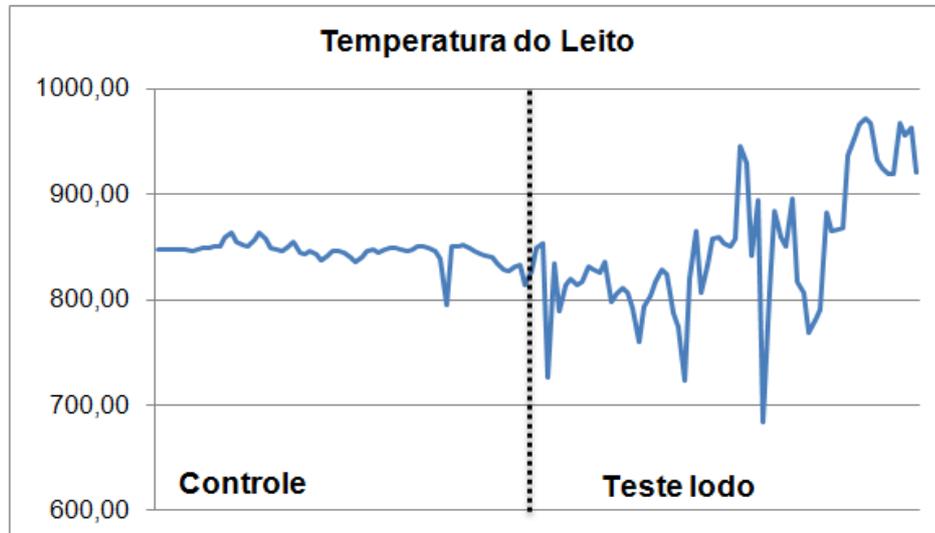


Figura 16- Perfil da temperatura do leito (°C) da caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e de teste com lodo biológico.

4.2.6 Material particulado

O material particulado é o termo utilizado para uma mistura de partículas sólidas e gotas de líquidos encontrados na atmosfera. Algumas dessas partículas podem ser grandes, escuras e, portanto, visíveis, tais como a fumaça ou a fuligem. Constitui-se por partículas microscópicas (1-30 μm), que apresentam habilidade de penetração no sistema respiratório e podem causar danos à saúde humana.

Como observado, Figura 17, houve aumento significativo do valor médio de material particulado, em virtude da queima de lodo biológico na caldeira. As médias diferiram significativamente ($P < 0,05$). O valor médio passou de 0,78 para 8,65ppm. Esse é um resultado negativo da queima do lodo biológico, visto os efeitos negativos do material particulado, citados anteriormente. Todavia, mesmo com o aumento reportado, os níveis ainda são aceitáveis, em cumprimento à resolução do Conama (Anexo 1), confirmando o potencial de queima do lodo na caldeira.

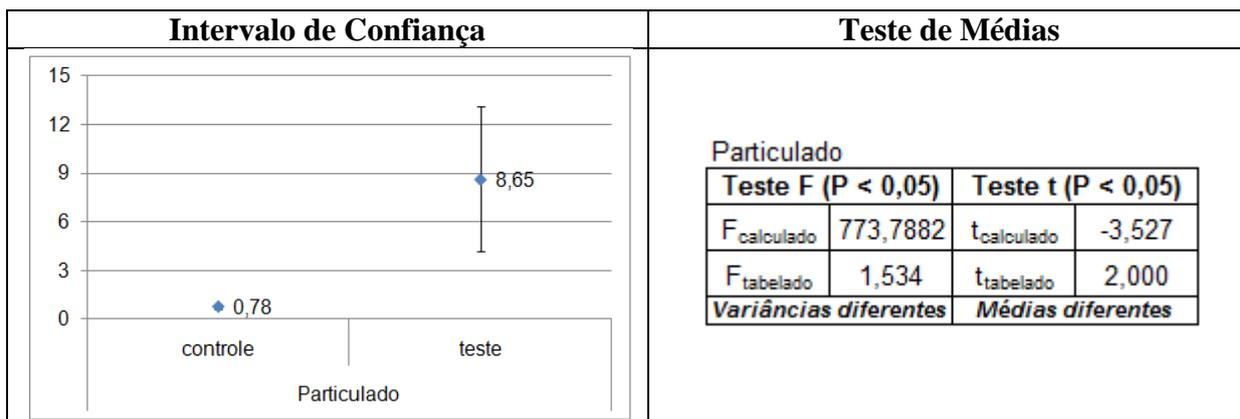


Figura 17-Intervalo de confiança para o material particulado (ppm), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

4.2.7 TAXA RESIDUAL DE ENXOFRE (TRS)

O enxofre total reduzido (TRS) pode ser representado, principalmente, pelos compostos: H_2S , CH_3SH , CH_3SCH_3 , $CH_3S_2CH_3$, que possuem habilidade de gerar odor mesmo em concentrações extremamente baixas.

Como observado, Figura 18, houve aumento do valor médio do valor de TRS, devido à queima de lodo biológico na caldeira. As médias diferiram estatisticamente ($P < 0,05$), no qual o valor médio passou de 4,98 para 6,74 ppm. O resultado evidencia um efeito negativo da queima de lodo biológico na caldeira, onde será esperado um maior odor. Entretanto, mesmo com o aumento, os níveis ainda são aceitáveis, em cumprimento à resolução do Conama (Anexo 1). Desse modo, o aumento de TRS não inviabiliza a implementação de queima do lodo biológico na caldeira de leito fluidizado.

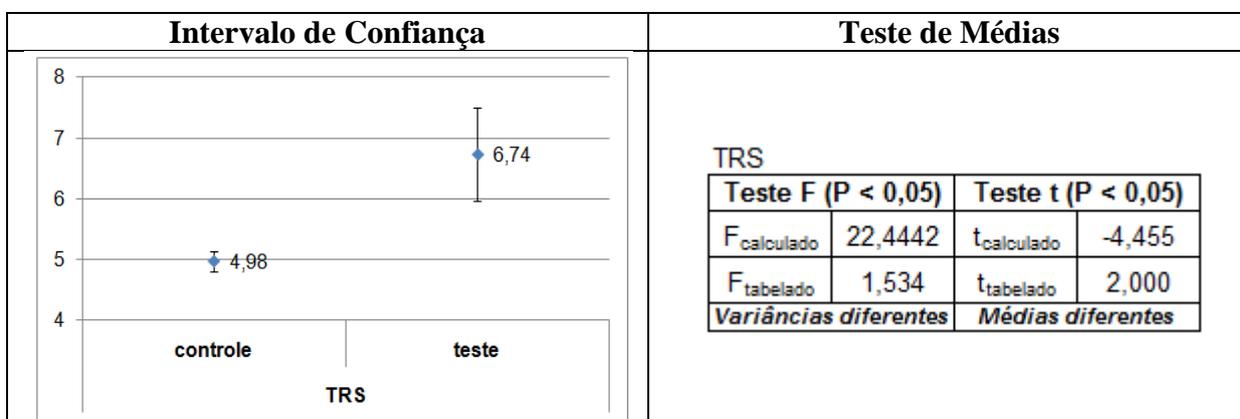


Figura 18-Intervalo de confiança para o TRS (ppm), das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo, e comparação das médias pelo teste t de Student ($\alpha = 5\%$).

5 CONCLUSÃO

De acordo com o presente estudo, o teste da queima de uma mistura de biomassa e lodo biológico em uma caldeira de leito fluidizado apresentou as seguintes tendências, quando comparado a um período controle (queima apenas de biomassa):

- Aumento do teor de umidade das amostras;
- Redução do valor do poder calorífico tal qual e manutenção do valor de poder calorífico para a amostra seca;
- Aumento da vazão de ar primário e redução da vazão de ar recirculado na caldeira;
- Manutenção da temperatura do leito;
- Aumento das emissões de material particulado e TRS da caldeira, entretanto, apresentando valores aceitáveis, segundo resolução do Conama.

Desse modo, foi possível concluir que a queima de lodo biológico da estação de tratamento em caldeira de leito fluidizado apresenta-se como uma prática atrativa à indústria de Celulose e Papel, contribuindo para a redução de ocupação do aterro sanitário.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2004) Abreviação de títulos de periódicos e publicações seriadas: NBR 10004, Resíduos Sólidos Classificação, Rio de Janeiro, 71p.

BRACELPA (2005) Associação Brasileira de Celulose e Papel. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra/index.html>. Acesso em: 2011

CARREIRO, M. R. M. (2009) Análise Exergética e Ambiental do Processamento do Licor Negro Gerado em Fábricas de Celulose e Papel- Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajuba.

EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL (IPPCEU) (2001) IPPCU Institute for Prospective Technological Studies and Sustainable Development – Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry. Seville, p. 550.

FENGEL, D.; WENEGER, G. (1989) **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**, Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FOELKEL, C. (2010) Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto-KVAERNER PULPING Industries andProcess – PulpanPaper. www.akerkvaerner.com. Acesso Janeiro 2012.

GUTIÉRREZ, A., ROMERO, J., DEL RIO, J.C. (2001)**Lipophilic extractives from EucalyptusGlobulus pulp during kraft cooking followed by TCF and ECF bleaching**. Holzforschung. v.55, p.260-264, 2001.

MACEDO J. C. F. (2006) Análise Térmica e Ambiental da Queima do Lodo Primário da Fabricação de Papel e Celulose em Caldeira de Biomassa à Grelha – Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá.

MOKFIENSKI, A.**ENF 580 – Ciclo de Recuperação Química do Processo Kraft**. Curso de Pós-Graduação Latu Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel. UFV. Viçosa, outubro, 2009.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008) Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, E. J. F. (Coord). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 52-63.

PIOTTO, Z. C. (2003) Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso. 2003. 321 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica de Sanitária) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

REEVE, D. (1996) Pulp Bleaching Practices and Issues Short Course, March 7, 1996 – Tappi, New Orleans L.A.

REZENDE, A. A. P. ; MATOS, A. T. ; SILVA, C. M. (2000) Utilização do Efluente de Indústria de Celulosa e Papel em Irrigação – Uma Revisão. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brasil, p.13.

ROSE, J.W., COOPER J.R. (1977) Technical Data on Fuel. The British National Committee, World Energy Conference.

SOUSA, C.A. (2002) Controle do Intumescimento Filamentoso em um Sistema de Lodos Ativados Utilizando Seletores Biológicos. – Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Viçosa.

THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY M.; FORSTER, C.F. (2001) The Treatment of Pulp and Paper Mill Effluent – A Review. Bioresource Technology – Elsevier p.275-286, May.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (2003) UNEP Draft Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for Pulping Process. Expert Group on Best Available Techniques and Best Environmental Practices. Villarrica, Chile, Second session, p. 42.

ANEXOS

Anexo 1

RESOLUÇÃO CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002 **Publicada no DOU no 224, de 20 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 92-95**

Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, no uso de suas competências atribuídas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, anexo à Portaria nº 326, de 15 de dezembro de 1994¹⁴²; e

Considerando que o princípio da precaução é o fundamento do desenvolvimento sustentável;

Considerando que os sistemas de tratamento térmico de resíduos são fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos, podendo constituir agressão à saúde e ao meio ambiente se não forem corretamente instalados, operados e mantidos;

Considerando que, entre estes poluentes destacam-se, pela sua periculosidade, os poluentes orgânicos persistentes, e que deve ser buscada a redução das emissões totais dos poluentes mencionados, com a finalidade de sua contínua minimização e, onde viável, sua eliminação definitiva;

Considerando que os poluentes orgânicos persistentes têm propriedades tóxicas, são resistentes à degradação, se bioacumulam, são transportados pelo ar, pela água e pelas espécies migratórias através das fronteiras internacionais e depositados distantes do local de sua emissão, onde se acumulam em ecossistemas terrestres e aquáticos;

Considerando que o estabelecimento de limites máximos de emissão, para poluentes a serem lançados na atmosfera, nas águas e no solo, por sistemas de tratamento térmico, contribui na implementação do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras, conforme previsto na Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997, resolve:

[...]

Art. 38. Todo e qualquer sistema de tratamento térmico não deve ultrapassar os seguintes limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos:

I - material particulado (MP) total: setenta miligramas por normal metro cúbico;

II - substâncias inorgânicas na forma particulada, agrupadas em conjunto como:

a) Classe 1: vinte e oito centésimos de miligrama por normal metro cúbico incluindo:

1. cádmio e seus compostos, medidos como cádmio (Cd);
2. mercúrio e seus compostos, medidos como mercúrio (Hg);
3. tálio e seus compostos, medidos como tálio (Tl);

b) Classe 2: um miligrama e quatro décimos por normal metro cúbico incluindo:

1. arsênio e seus compostos, medidos como arsênio (As);
2. cobalto e seus compostos, medidos como cobalto (Co);
3. níquel e seus compostos, medidos como níquel (Ni);
4. telúrio e seus compostos, medidos como telúrio (Te);
5. selênio e seus compostos, medidos como selênio (Se);

c) Classe 3: sete miligramas por normal metro cúbico incluindo:

1. antimônio e seus compostos, medidos como antimônio (Sb);

2. chumbo e seus compostos, medidos como chumbo (Pb);
3. cromo e seus compostos, medidos como cromo (Cr);
4. cianetos facilmente solúveis, medidos como Cianetos (CN);
5. cobre e seus compostos, medidos como cobre (Cu);
6. estanho e seus compostos, medidos como estanho (Sn);
7. fl uoretos facilmente solúveis, medidos como fl úor (F);
8. manganês e seus compostos, medidos como manganês (Mn);
9. platina e seus compostos, medidos como platina (Pt);
10. paládio e seus compostos, medidos como paládio (Pd);
11. ródio e seus compostos, medidos como ródio (Rh);
12. vanádio e seus compostos, medidos como vanádio (V).

III. Gases:

1. óxidos de enxofre: duzentos e oitenta miligramas por normal metro cúbico, medidos como dióxido de enxofre;
2. óxidos de nitrogênio: quinhentos e sessenta miligramas por normal metro cúbico, medidos como dióxido de nitrogênio;
3. monóxido de carbono: cem partes por milhão por normal metro cúbico;
4. compostos clorados inorgânicos: oitenta miligramas por normal metro cúbico, até 1,8 kg/h, medidos como cloreto de hidrogênio;
5. compostos fl uorados inorgânicos: cinco miligramas por normal metro cúbico, medidos como fl uoreto de hidrogênio;
6. Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em TEQ (total de toxicidade equivalente) da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina): 0,50 ng/Nm³;

§ 1o Os fatores de equivalência de toxicidade (FTEQ) são aqueles constantes do anexo I.

§ 2o Os parâmetros medidos devem ser corrigidos pelo teor de oxigênio, na mistura de gases de combustão, do ponto de descarga, para sete por cento em base seca.

§ 3o O órgão ambiental competente pode restringir os limites estabelecidos, dependendo das condições de localização e dos padrões de qualidade do ar da região.

Anexo 2

Tabela 1: Dados para as variáveis: teor seco, densidade e poder calorífico das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo.

Teor seco (%)		Densidade (kg/m ³)		Poder calorífico tal qual (MJ/kg)		Poder calorífico seco (MJ/kg)	
controle	teste	Controle	teste	controle	Teste	Controle	teste
66,72	32,24	98,81	129,08	9,68	1,58	17,24	17,36
68,60	51,04	115,53	113,15	10,06	5,74	17,60	16,42
66,32	62,99	117,71	134,31	9,80	7,28	17,13	17,61
63,93	56,85	108,86	130,05	9,48	7,07	16,84	17,04
61,51	55,05	91,01	95,64	12,28	6,30	16,93	16,72
67,38	42,52	93,14	111,32	12,08	5,08	17,96	16,67

Anexo 2

Tabela 2: Valores das variáveis avaliadas das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo.

Prod Vapor (t/h)		Ar primário (m ³ /h)		Ar recirculado (m ³ /h)		Temp Leito (°C)		TRS (ppm)		Particulado (ppm)	
controle	teste	controle	teste	Controle	teste	controle	teste	controle	teste	controle	teste
78,80	74,49	16328,13	21533,27	28039,16	22966,93	847,09	832,44	5,77	4,96	0,90	2,36
75,19	76,81	18031,13	28556,94	27035,74	16178,05	847,21	814,09	5,79	4,59	0,29	2,52
82,94	83,75	15724,40	27889,58	29004,35	20324,30	847,70	826,64	5,17	4,44	0,29	2,76
81,00	93,25	13113,60	29536,47	31341,17	18925,59	848,18	849,17	5,54	4,73	0,39	3,14
87,48	85,85	13606,68	23517,55	30988,44	24255,86	847,89	854,03	5,55	5,27	0,44	4,71
79,85	65,05	11762,53	37620,51	32847,40	7022,06	847,16	727,03	6,01	8,37	0,38	6,64
80,87	69,55	13434,52	28369,75	31189,26	16135,76	846,62	834,59	6,09	6,26	0,32	3,97
83,23	87,44	16180,72	34156,75	28517,02	11813,51	847,35	788,51	5,80	4,34	0,56	2,97
95,41	95,57	16914,51	34199,48	27648,04	13712,82	848,29	813,87	5,24	3,86	0,95	2,64
81,43	89,27	15553,66	35422,38	29032,77	13954,85	849,11	819,56	5,88	3,61	1,23	2,63
91,81	88,44	17067,33	39707,47	27585,12	10384,84	849,81	813,91	4,92	3,56	0,93	2,54
71,67	95,04	15187,67	36730,56	29324,56	14329,72	851,16	817,32	5,75	3,85	0,53	2,13
78,56	85,76	13803,70	33858,66	30768,91	15985,38	859,19	830,82	6,00	4,55	0,29	1,69
70,21	93,11	9866,25	30858,43	34790,98	18758,40	863,02	828,34	6,40	4,47	0,25	1,58
88,62	88,14	13797,27	32966,02	30635,05	16119,84	855,31	825,98	5,73	4,51	0,23	1,95
87,64	86,39	14332,11	35757,32	30118,61	14050,87	852,45	836,30	5,77	4,69	0,52	2,38
84,47	103,56	13070,77	38730,47	31459,34	9548,18	850,89	797,24	5,42	4,03	0,95	4,26

Prod Vapor (t/h)		Ar primário (m ³ /h)		Ar recirculado (m ³ /h)		Temp Leito (°C)		TRS (ppm)		Particulado (ppm)	
controle	teste	controle	teste	Controle	teste	controle	teste	controle	teste	controle	teste
81,43	104,28	13688,59	38523,75	30902,48	10458,46	856,94	804,72	5,46	3,85	1,28	14,76
71,12	106,93	12297,83	43675,61	32101,81	10109,94	864,23	811,00	5,83	3,78	1,28	9,08
78,08	94,17	12972,23	43713,61	31555,70	10449,38	858,06	806,92	4,76	4,28	1,25	4,56
73,75	88,15	19642,10	44111,63	24970,12	8368,94	849,14	792,14	5,27	5,06	1,12	9,51
87,26	104,42	11823,71	47679,74	32676,15	4908,89	847,60	760,61	4,83	5,03	0,88	4,53
95,47	108,52	13098,30	51469,34	31357,22	167,40	846,43	794,09	4,82	4,91	0,64	5,18
112,83	101,70	13584,12	48036,64	31831,78	2736,09	850,29	803,71	4,78	4,70	0,46	6,72
101,07	110,65	14142,23	35697,65	30786,03	12523,18	854,42	817,07	5,06	4,58	0,30	3,60
91,18	98,05	13939,25	40952,36	30669,28	8990,05	845,18	828,84	4,80	4,85	0,22	10,11
100,17	93,85	14275,66	39396,00	30255,33	8842,93	843,24	823,86	4,40	5,37	0,41	13,18
103,76	105,17	17637,71	50109,87	27536,46	2932,01	845,41	787,15	4,39	5,11	0,61	10,73
91,56	89,11	12451,30	41778,54	32170,43	9515,67	843,52	773,78	4,87	8,67	0,59	10,00
116,15	93,83	17349,28	44484,74	28527,72	8894,21	837,57	724,01	4,47	7,74	0,40	8,15
111,57	106,54	18232,96	41203,28	27322,63	11464,99	840,96	820,11	4,16	6,78	0,23	10,29
90,53	120,97	15081,14	35499,18	29526,75	12763,24	846,29	865,00	4,02	6,45	0,19	6,55
80,07	103,56	13658,38	35474,49	30836,87	12629,85	846,76	807,11	4,38	6,53	0,18	3,84
81,79	104,68	16894,61	42156,71	27701,44	8878,52	844,37	832,44	4,29	6,40	0,22	3,61
78,10	114,73	16963,47	40222,83	27806,50	9127,23	839,66	857,54	4,32	6,11	0,34	4,92
100,91	119,33	20212,46	36277,66	24375,55	16748,02	835,95	859,05	4,03	5,94	0,47	8,13

Prod Vapor (t/h)		Ar primário (m ³ /h)		Ar recirculado (m ³ /h)		Temp Leito (°C)		TRS (ppm)		Particulado (ppm)	
controle	teste	controle	teste	Controle	teste	controle	teste	controle	teste	controle	teste
106,16	112,53	21221,25	35655,97	23465,79	12708,39	840,45	852,98	4,22	6,35	0,42	4,33
93,33	120,20	15924,86	35953,88	28623,71	12175,32	846,78	850,28	4,44	7,06	0,25	3,68
85,85	116,84	15582,93	37167,55	28986,86	11187,17	847,69	857,78	4,71	8,78	0,14	3,03
91,49	119,92	14101,98	33837,89	30457,45	13269,95	845,03	945,47	4,46	6,79	0,33	2,38
92,17	98,12	14667,50	22981,29	29920,24	23258,69	847,56	929,66	4,31	6,00	0,57	1,72
93,38	112,74	14795,19	27413,56	29781,59	20366,61	849,59	842,09	4,22	5,61	0,74	1,52
91,77	98,93	14711,12	26122,04	29906,21	20100,59	848,49	893,65	4,10	7,50	0,82	5,67
70,84	45,30	12970,02	20709,45	31485,53	6785,80	846,83	683,48	4,88	16,23	0,91	65,40
89,32	80,17	14784,45	42219,30	29786,86	5770,00	846,32	806,11	4,44	8,61	1,56	6,32
89,16	106,17	15851,65	40133,25	28798,83	10533,76	848,04	883,45	4,67	7,59	2,47	32,20
91,52	98,18	16119,96	35974,39	28425,66	15352,19	849,77	858,98	4,59	7,86	3,12	6,19
89,11	104,53	16623,95	37519,41	27929,42	9823,60	849,75	849,96	4,46	7,54	2,45	3,65
101,32	108,44	18331,94	34014,76	26197,16	12839,06	848,82	895,52	4,18	7,18	1,60	1,60
102,37	102,24	17677,79	25588,53	26807,86	20803,69	846,72	816,85	4,02	7,71	0,94	2,05
99,48	91,46	16747,07	17908,72	27727,94	15304,57	838,24	806,71	3,85	10,44	0,58	91,75
80,16	61,27	21886,33	31570,82	22350,94	65,89	795,66	769,24	5,68	24,22	0,23	96,48
75,75	85,44	12738,29	45058,08	31870,41	5568,55	850,08	780,73	5,79	8,67	0,22	4,00
76,59	80,34	12213,53	48591,87	32392,74	1928,29	850,99	791,18	6,01	8,89	0,36	4,32
91,90	108,68	15532,86	43254,53	28957,71	8803,70	851,22	882,75	5,38	8,12	0,49	4,39

Prod Vapor (t/h)		Ar primário (m ³ /h)		Ar recirculado (m ³ /h)		Temp Leito (°C)		TRS (ppm)		Particulado (ppm)	
controle	teste	controle	teste	Controle	teste	controle	teste	controle	teste	controle	teste
98,81	100,34	16492,22	33651,86	28251,11	17470,11	848,72	865,61	5,10	8,23	0,54	3,37
92,90	103,24	16160,60	28245,35	28384,87	22298,87	845,93	865,95	4,98	7,91	0,58	2,23
95,55	87,80	16955,94	21374,31	27691,72	26758,75	843,69	867,75	4,58	7,74	0,65	1,60
91,83	99,51	15803,29	43100,51	28721,17	10016,28	842,05	937,03	4,56	7,80	0,76	1,55
102,42	101,94	18583,45	37376,05	26038,64	15582,75	840,09	951,97	4,68	8,31	0,90	1,50
100,89	98,15	19565,37	33597,08	25077,79	18863,45	834,54	966,44	5,07	7,48	1,31	1,30
89,15	69,55	27604,27	28429,30	17006,91	21333,26	828,01	972,28	5,60	8,60	1,79	1,06
88,83	72,62	28422,72	14365,33	15988,22	30241,00	827,21	967,95	5,26	9,47	2,17	0,88
86,64	79,70	27827,71	10929,39	16775,72	33707,11	832,11	931,94	4,65	8,30	2,28	0,85

Anexo 3

Tabela 1: Dados do intervalo de confiança e testes F e t ($\alpha= 5\%$) para as variáveis: teor seco, densidade e poder calorífico das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo.

		Teor Seco		Densidade		Poder Calorífico tal qual		Poder Calorífico seco		
		Controle	Teste	Controle	Teste	Controle	Teste	Controle	Teste	
	Média	65,74	50,12	104,18	118,93	10,56	5,51	17,28	16,97	
	Desvio padrão (s)	2,58	11,08	11,47	14,81	1,27	2,09	0,43	0,45	
	Nível de significância	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	t tabelado	2,571	2,571	2,571	2,571	2,571	2,571	2,571	2,571	
IT	t tabelado. s / \sqrt{n}	2,71	11,63	12,04	15,54	1,33	2,19	0,45	0,57	
	Limite inferior	63,03	38,49	92,14	103,39	9,23	3,32	16,83	16,40	
	Limite superior	68,45	61,75	116,22	134,47	11,89	7,70	17,73	17,54	
Teste F	HO: variância 1 = variância 2	F calculado	18,4052		1,6672		2,7321		1,1318	
		F tabelado	F5% (5,5)		F5% (5,5)		F5% (5,5)		F5% (5,5)	
			5,050		5,050		5,050		5,050	
		Resultado	F calculado > F tabelado		F calculado > F tabelado		F calculado > F tabelado		F calculado > F tabelado	
			Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese	
		Variancias diferentes (P<0,05)		Variancias diferentes (P<0,05)		Variancias diferentes (P<0,05)		Variancias diferentes (P<0,05)		
Teste t	HO: média 1 = média 2	t calculado	3,366		-1,928		5,061		1,236	
		n*	5,542		9,411		8,228		9,962	
		t tabelado	t 0,025 (5)		t 0,025 (9)		t 0,025 (8)		t 0,025 (9)	
			2,571		2,262		2,306		2,262	
		Resultado	[t calculado] > t tabelado		[t calculado] < t tabelado		[t calculado] > t tabelado		[t calculado] < t tabelado	
			Rejeita-se hipótese		Aceita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Aceita-se hipótese	
		Médias diferem (P<0,05)		Médias não diferem (P>0,05)		Médias diferem (P<0,05)		Médias não diferem (P>0,05)		

Tabela 2:Dados do intervalo de confiança e testes F e t ($\alpha= 5\%$) para as variáveis avaliadas das amostras queimadas na caldeira de leito fluidizado, nos períodos controle e teste lodo.

		Produção de Vapor (t/h)		Ar Primário (m³/h)		Ar Recirculado (m³/h)		Temperatura do Leito (°C)		TRS (ppm)		Particulado (ppm)	
		Controle	Teste	Controle	Teste								
	Média	89,14	95,23	1.625,29	35.040,93	28610,06	13.404,58	846,06	837,54	4,98	6,74	0,78	8,65
	Desvio padrão (s)	10,54	15,25	3.566,34	8.560,80	3.563,71	6.812,46	9,32	57,85	0,65	3,09	0,64	17,84
	t _{tabelado}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Nível de significancia	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
IT	t _{tabelado} . s / \sqrt{n}	2,64	3,81	891,58	2.140,20	890,93	1.703,12	2,33	14,46	0,16	0,77	0,16	4,46
	Limite Inferior	86,50	91,41	15.133,71	32.900,73	27719,15	11.701,47	843,68	823,08	4,82	5,96	0,62	4,19
	Limite Superior	91,77	99,04	16.916,87	37.181,13	29.501,01	15.107,70	848,34	852,01	5,14	7,51	0,94	13,10
Teste F	F _{calculado}	2,0921		5,7621		3,6543		38,5434		22,4442		773,7882	
	F _{tabelado}	F5% (63,63)		F5% (63,63)									
		1,518		1,518		1,518		1,518		1,518		1,518	
	Resultado	F _{calculado} > F _{tabelado}		F _{calculado} > F _{tabelado}									
		Rejeita-se a hipótese		Rejeita-se a hipótese		Rejeita-se a hipótese		Rejeita-se a hipótese		Rejeita-se a hipótese		Rejeita-se a hipótese	
	Variancia diferentes (P<0,05)		Variancia diferentes (P<0,05)		Variancia diferentes (P<0,05)		Variancia diferentes (P<0,05)		Variancia diferentes (P<0,05)		Variancia diferentes (P<0,05)		
Teste t	t _{calculado}	-2,628		-16,404		15,855		1,156		-4,455		-3,527	
	n*	112,025		84,228		95,078		66,267		68,603		63,163	
	t _{tabelado}	t 0,025 (112)		t 0,025 (84)		t 0,025 (95)		t 0,025 (66)		t 0,025 (63)		t 0,025 (63)	
		2,00		2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
	Resultado	[t calculado]>t tabelado		[t calculado]>t tabelado		[t calculado]>t tabelado		[t calculado]<t tabelado		[t calculado]>t tabelado		[t calculado]>t tabelado	
		Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Aceita-se hipótese		Rejeita-se hipótese		Rejeita-se hipótese	
Médias diferem (P<0,05)		Médias diferem (P<0,05)		Médias diferem (P<0,05)		Médias não diferem (P>0,05)		Médias diferem (P<0,05)		Médias diferem (P<0,05)			