

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ALBERTO ANTÔNIO RESENDE DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DO
APROVEITAMENTO DE LODOS COMO COMBUSTÍVEL EM
FÁBRICA DE CELULOSE**

Ilha Solteira

2019

ALBERTO ANTÔNIO RESENDE DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DO
APROVEITAMENTO DE LODOS COMO COMBUSTÍVEL EM
FÁBRICA DE CELULOSE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Ilha Solteira, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Conhecimento: Ciências Térmicas.

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A447a Almeida, Alberto Antônio Resende de.
Avaliação técnica, econômica e ambiental do aproveitamento de lodos como combustível em fábrica de celulose / Alberto Antônio Resende de Almeida. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2019

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Inclui bibliografia

1. Lodos. 2. Biocombustíveis. 3. Caldeira de biomassa. 4. Aterro industrial.



Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRUB - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação técnica, econômica e ambiental do aproveitamento de lodos como combustível em fábrica de celulose

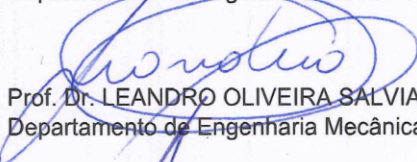
AUTOR: ALBERTO ANTÔNIO RESENDE DE ALMEIDA

ORIENTADOR: RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

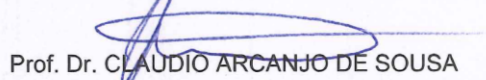
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CLÁUDIO ARCANJO DE SOUSA
Faculdade de Ciências Biológicas e Ambientais / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Ilha Solteira, 28 de junho de 2019

Dedico este trabalho à minha mãe, irmãos, esposa, filhos e amigos, que me deram inspirações para viver intensamente a vida, acreditar nos valores essenciais da ética e da gratidão, e engrandecer a esperança do eterno aprender.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, que muito me inspirou, através de suas fontes de energia, a encontrar caminhos que levassem ao sonho do mestrado e a certeza de continuar minha necessária transformação profissional.

À minha mãe que, mesmo no seu mundo imaginário, sinto o orgulho que lhe propicio.

À minha esposa Solange de Moraes, por ter acompanhado esta caminhada e me dado forças em momentos decisivos e de incertezas; assim como a meus filhos e familiares pelo apoio, compreensão e motivação.

A meu orientador Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos, que teve papel fundamental para, através das suas disciplinas e de seus conhecimentos, transferir informações, caminhos e oportunidades científicas para o desenvolvimento deste trabalho.

A Renato Bastos Ottoni (*in memoriam*), por ter sido um incentivador deste meu projeto.

Ao Alexandre Figueiredo, gestor e amigo que acreditou na minha determinação e capacidade de dar este importante passo acadêmico.

Ao corpo executivo das áreas de Utilidades e Meio Ambiente da Suzano, Unidade de Três Lagoas (MS), Eduardo Sidnei Ferraz, Rodrigo Cezar de Bulhões, Vagner Anastacio e Maria Tereza Borges, que muito colaboraram com incentivo e informações aos meus estudos.

Ao amigo Fernando Raasch Pereira, que juntos caminhamos e acreditamos nesta árdua jornada.

Aos Professores e colegas que me incentivaram a continuar sempre.

*“O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza,
são domínios em que nos é consentido
ficar crianças toda a vida”.*

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta uma alternativa para a utilização do lodo gerado em estação de tratamento de efluentes de uma indústria de celulose sul mato-grossense, mais especificamente para a queima em caldeira de leito fluidizado borbulhante, misturado com biomassa de madeira, minimizando a quantidade e o custo de seu envio para aterro industrial. As caracterizações físico-químicas dos lodos e cinzas, em amostras pontuais, foram analisadas por laboratório acreditado pela ABNT, seguindo os critérios da NBR 10.004:2004, sendo que os resultados comprovaram que tais resíduos se enquadram dentro da norma como de Classe IIA. As emissões atmosféricas também foram analisadas, por laboratório credenciado, seguindo os critérios da resolução CONAMA 316/2002, tendo sido observado que as quantidades de material particulado, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, ácido clorídrico, cloro livre, fluoretos, metais, cianeto, dioxinas e furanos, atendem aos limites legais previstos na referida resolução. Instrumentos instalados na chaminé da caldeira de biomassa, monitoraram as emissões atmosféricas referentes à material particulado, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e monóxido de carbono, em todo o período operacional da caldeira. O período considerado para estudo foi de Janeiro/2017 a Julho/2018, o qual envolve o início da operação de uma nova linha de produção de celulose, elevando a capacidade produtiva de vapor da caldeira de biomassa, de 120 para 150 t/h de vapor, e a produção de celulose de 1,275 para 3,200 milhões de toneladas por ano. Tomando como base os dados deste período puderam ser notadas algumas alterações significativas comparando-se as situações antes e após o incremento de produção de celulose, a saber: i) a destinação de lodos para aterro em relação ao volume gerado de lodos foi reduzida de 10,5 para 6,2%; ii) a relação de volume de lodos na mistura do biocombustível total para a caldeira foi duplicada (de 21 para 42%); iii) a produção de vapor em relação ao biocombustível consumido aumentou de 3,6 para 3,8 toneladas de vapor por tonelada de biocombustível. Por fim, considerando o último trimestre desse estudo, após estabilidade operacional da segunda fábrica, tem-se que 94,2% do volume de lodos gerados foram destinados para queima na caldeira de biomassa, com isto, é possível prever um aumento da vida útil de um aterro industrial (250.000 m³ alteado para 600.000 m³) de 2,3 para 14,6 anos. Assim, considerando-se os custos com movimentação de lodos para aterro e o investimento necessário para a construção de uma célula com a capacidade requerida, a utilização do lodo como combustível promove uma economia considerável para a empresa, além de que o investimento requerido para construção do aterro pode ser equacionado em aproximadamente 3,5 anos, contabilizando o volume de celulose produzido neste período. Assim, foi comprovado que, além de ser tecnicamente e ambientalmente viável a geração de vapor e energia através do aproveitamento do lodo para queima em caldeiras de fábricas de celulose, isso possibilita a extensão da vida útil de aterros industriais para acondicionamento de resíduos, minimizando impactos e custos intensivos com este tipo de passivo.

Palavras-chave: Lodos. Biocombustíveis. Caldeira de biomassa. Aterro industrial.

ABSTRACT

This work presents an alternative for the use of sludge generated in a wastewater treatment plant of a Mato Grosso do Sul pulp industry, more specifically for burning in a bubbling fluidized bed boiler mixed with wood biomass, minimizing the amount and the shipping cost to industrial landfill. The physicochemical characterization of sludge and ash in point samples were analyzed by an external laboratory accredited by ABNT, following the criteria of NBR 10.004:2004, and the results showed that such residues fall within the standard as Class IIA. Atmospheric emissions were also analyzed by an accredited laboratory following the criteria of CONAMA Resolution 316/2002, and it was observed that the amounts of particulate matter, sulfur oxides, nitrogen oxides, hydrochloric acid, free chlorine, fluorides, metals, cyanide dioxins and furans meet the legal limits laid down in that resolution. Instruments installed in the biomass boiler chimney monitored atmospheric emissions from particulate matter, nitrogen oxides, sulfur oxides and carbon monoxide throughout the boiler operating period. The period considered in this study was January/2017 to July/2018 that involves the start of operation of a new pulp production line, increasing the production capacity of the biomass boiler steam from 120 to 150 t/h of steam, and pulp production from 1,275 to 3,200 million tons per year. Based on data for this period some significant changes could be noted by comparing the situations before and after the increase in pulp production, namely: i) destination from landfill sludge to sludge generated volume was reduced from 10.5 to 6.2%; ii) the volume ratio of sludge in the total biofuel mixture to the boiler was doubled (from 21 to 42%); (iii) steam production relative to biofuel consumed increased from 3.6 to 3.8 ton of steam per ton of biofuel. Finally, considering the last quarter of this study, after operating stability of the second plant, it has been found that 94.2% of the volume of sludge generated was intended for burning in the biomass boiler, this can lead to an increase in the useful life of an industrial landfill (250,000 m³ raised to 600,000 m³) from 2.3 to 14.6 years. Thus, considering the costs of moving sludge to landfill and the investment required to construct a cell with the required capacity, the use of sludge as fuel promotes considerable savings for the company, and the investment required for construction of landfill can be equated in about 3.5 years, accounting for the volume of pulp produced in this period. Thus, it has been proved that, in addition to being technically and environmentally viable, the generation of steam and energy by means the use of sludge for burning in pulp mill boilers; this enables the extension of the useful life of industrial landfills for packaging waste, minimizing impacts and intensive costs with this type of liability.

Keywords: Sludge. Biofuels. Biomass boiler. Industrial landfill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Perfil geofísico da distribuição de florestas plantadas de eucalipto no Brasil	16
Figura 2	- Produtividade e rotação do setor florestal brasileiro x outras regiões do mundo	16
Figura 3	- Produção brasileira de celulose	17
Figura 4	- Produção e consumo de energia da indústria florestal	18
Figura 5	- Principais constituintes químicos da madeira	21
Figura 6	- Diagrama simplificado da produção de celulose pelo processo <i>Kraft</i>	22
Figura 7	- Diagrama simplificado do processo de cozimento <i>Kraft</i>	23
Figura 8	- <i>Layout</i> dos processos de lavagem, deslignificação e depuração marrom	25
Figura 9	- <i>Layout</i> dos processos de branqueamento	26
Figura 10	- <i>Layout</i> do processo de secagem da celulose	27
Figura 11	- <i>Layout</i> do circuito de licor negro e caldeira de recuperação química	29
Figura 12	- <i>Layout</i> dos processos caustificação e forno de cal	30
Figura 13	- Diagrama de uma planta de cogeração de energia em fábrica de Celulose	33
Figura 14	- Consumo de energia por fontes no seguimento de papel e celulose	34
Figura 15	- Fontes e gerações de poluentes da indústria de celulose e papel	35
Figura 16	- <i>Layout</i> de Estação de Tratamento de Efluentes de uma fábrica de celulose	37
Figura 17	- Disposição das células de aterro industrial da Fibria (atual Suzano) – MS	39
Figura 18	- <i>Layout</i> da caldeira de biomassa da Fibria (atual Suzano) – MS	41
Figura 19	- Balanço mensal da geração total de lodos	60
Figura 20	- Comparação estatística da geração de lodos	61
Figura 21	- Comparação estatística da geração de lodos por produção de celulose	62
Figura 22	- Balanço mensal geração de lodos e queima na caldeira de biomassa	64
Figura 23	- Geração e queima de lodos: Relatório de seleção de modelo	65
Figura 24	- Lodos enviados para aterro (%)	67
Figura 25	- Lodos (%) em relação ao total de biocombustível para queima na Caldeira	69
Figura 26	- Síntese mensal da produção de vapor da caldeira de biomassa (t/h)	72
Figura 27	- Comparação da produção de vapor/biocombustível (tonelada/tonelada)	73
Figura 28	- Comparação da economia entre as fases do estudo	76
Figura 29	- Avaliação do aumento queima da biomassa na vida útil do aterro	79
Figura 30	- Controle da emissão de NOx <i>on line</i>	85
Figura 31	- Controle da emissão de Materiais Particulados <i>on line</i>	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Balanço mensal de lodos gerados durante o período considerado para estudo	59
Tabela 2	- Balanço mensal de lodos queimados na caldeira de biomassa	63
Tabela 3	- Balanço mensal de lodos enviados para aterro industrial	66
Tabela 4	- Balanço mensal da relação de queima de lodos e biomassa na caldeira	68
Tabela 5	- Balanço mensal da produção de vapor pela caldeira de biomassa	71
Tabela 6	- Balanço econômico com a operação de lodos para queima em caldeira	75
Tabela 7	- Avaliação da vida útil de um aterro x volume de lodo enviado para este aterro	78
Tabela 8	- Amortização do investimento com aterro industrial ao longo do tempo	80
Tabela 9	- Resultados analíticos de lodos	81
Tabela 10	- Resultados analíticos dos lodos, biomassa de madeira e misturas	82
Tabela 11	- Resultados analíticos das cinzas	83
Tabela 12	- Resultados analíticos das emissões atmosféricas	84

LISTA DE ABREVIATURAS

ABTCP	- Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ABRAF	- Associação Brasileira de Florestas Plantadas
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Análise do Ciclo de Vida
APP	- Áreas de Preservação Permanente
ATD	- Análise Termogravimétrica Derivativa
BRACELPA	- Associação Brasileira de Celulose e Papel
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
B.S.	- Base Seca
CENBIO	- Centro Nacional de Referência em Biomassa
CERFLOR	- Programa Nacional de Certificação Florestal
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECF	- <i>Elemental Chlorine Free</i>
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
ETA	- Estação de Tratamento de Águas
FSC	- <i>Forest Stewardship Council</i>
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo
IBÁ	- Indústria Brasileira de Árvores
IMASUL	- Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
MME	- Ministério de Minas e Energia
NBR	- Expressão usada para Norma Técnica
PIB	- Produto Interno Bruto
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
PEFC	- <i>Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes</i>
RL	- Áreas de Reserva Legal
RPPN	- Áreas de Reserva Particular do Patrimônio Natural
TGA	- Análise Termogravimétrica
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização e objetivos	13
1.2	A indústria de celulose no Brasil	14
1.3	O processo de produção de celulose <i>Kraft</i>	20
1.4	Cogeração de energia em uma indústria de celulose <i>Kraft</i>	30
1.5	A indústria de papel e celulose no Setor Elétrico Brasileiro	33
1.6	Aspectos dos lodos gerados na Indústria de Celulose	34
1.7	Caldeira de biomassa com tecnologia de leito fluidizado borbulhante	39
2	REVISÃO DE LITERATURA	43
2.1	Lodos gerados em estações de tratamentos de águas e de efluentes, seus inconvenientes e destinações orientadas dentro do conceito de sustentabilidade	43
2.2	Composição qualitativa de lodos gerados em estações de tratamentos de águas/efluentes, biomassa de madeira e cinzas da combustão destes materiais	45
2.3	Potencial técnico de lodos gerados em estações de tratamentos de águas/efluentes misturados com biomassa de madeira, usados como biocombustíveis	47
2.4	Aspectos das emissões atmosféricas durante a queima da mistura de lodos e de biomassa de madeira	49
3	METODOLOGIA	51
3.1	Dados e informações	51
3.2	Caracterização dos resíduos	52
3.3	Caracterização química elementar e por aproximação dos materiais	54
3.4	Caracterização dos gases de exaustão da caldeira de biomassa	54
3.5	Monitoramento dos gases de exaustão da caldeira de biomassa	56
4	RESULTADOS	58
4.1	Balanco mensal de lodos gerados nas Estações de Tratamentos de Efluentes (ETE's)	58
4.2	Balanco mensal de lodos enviados para queima na caldeira de biomassa	62
4.3	Balanco mensal de lodos enviados para aterro industrial	66

4.4	Balanco mensal da relação biomassa de madeira e lodos para queima na caldeira	68
4.5	Balanco mensal da produção de vapor na caldeira de biomassa	70
4.6	Balanco econômico da não disposição de lodos em aterro industrial	74
4.7	Caracterização química e físico-química de lodos e biomassa para aproveitamento dos resíduos como biocombustíveis	80
4.8	Avaliações analíticas das emissões atmosféricas	83
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	89

PREÂMBULO

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Associado do Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP (IPBEN) no Campus de Ilha Solteira e está integrado às linhas de pesquisa de Energia e Sistemas Térmicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM). O trabalho está organizado em cinco capítulos, cujos conteúdos serão apresentados brevemente.

O Capítulo 1 corresponde à introdução, que visa contextualizar o tema abordado, além de detalhar a motivação e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 traz uma revisão da literatura, abrangendo os principais tópicos relacionados ao tema do trabalho (lodos, efluentes, resíduos, biomassa, geração de energia, cinza, emissões atmosféricas, dentre outros).

O Capítulo 3 descreve toda a metodologia utilizada no trabalho, desde a forma de obtenção de dados e informações gerais sobre a planta e processos da unidade industrial; caracterização físico-química das matérias primas para queima em caldeira; e caracterização dos gases de exaustão e das cinzas das caldeiras.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no que diz respeito à utilização do lodo de estação de tratamento de efluentes misturado com biomassa de madeira para queima em caldeira, levando-se em conta o desempenho, as emissões e os custos evitados com aterro industrial.

O Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, sintetizando os resultados obtidos e apresentando algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que serviram como base para a realização do presente trabalho.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e objetivos

A indústria de celulose demanda grande quantidade de energia elétrica e térmica para os seus processos, ao longo de sua cadeia produtiva gera materiais que são aproveitados para suprir mais de 90% desta necessidade energética (FIBRIA, 2017). No processo *Kraft*, o licor negro, oriundo da deslignificação da madeira, é queimado em caldeira de recuperação; cascas e resíduos de madeira são queimados em caldeira de biomassa e complementam a matriz de biocombustíveis historicamente utilizados. Com o advento de caldeiras de biomassa com a tecnologia de leito fluidizado, observam-se oportunidades para incorporar na cesta de biocombustíveis os lodos gerados nas estações de tratamentos de águas e de efluentes, oportunizando ganhos com a produção de energia, redução da dependência de combustíveis de origens fósseis e reduções na disposição de materiais em aterros industriais.

Em função do atual momento de conscientização ambiental, a utilização de resíduos derivados dos processos produtivos torna-se um dos alvos para indústria brasileira e mundial. Os processos de fabricação de celulose e papel produzem alguns resíduos que não são reaproveitados na sua totalidade, sendo necessária a sua disposição em aterros. A queima de subprodutos e de resíduos destes processos contribui para minimizar a dependência de combustíveis fósseis, como gás natural e óleo combustível (MACEDO, 2006).

O aproveitamento de materiais até então considerados como rejeitos estão tendo um novo enfoque, transformando-os de um problema à uma solução lucrativa, sendo que a elaboração de um modelo de desenvolvimento auto-sustentável, na questão ambiental, desponta como objetivo principal dentro de uma sociedade consciente (CAMPREGHER, 2005).

Dentre as tecnologias utilizadas para combustão de biomassa, os leitos fluidizados se destacam como os mais vantajosos. Dentre as vantagens estão o baixo impacto ambiental, a alta flexibilidade do combustível a ser utilizado, o favorável contato gás-sólido, a facilidade de controle e a distribuição homogênea da temperatura, além da alta eficiência de combustão devido a elevados coeficientes de transferência de calor e de massa (SILVA, 2011).

A diversificação da matriz energética por meio da biomassa representa, portanto, uma alternativa ao suprimento da demanda global por energia, cuja utilização tem ganhado muita atenção ao passo que crescem, também, as preocupações acerca dos inúmeros impactos ambientais (poluição atmosférica, chuva ácida, aquecimento global, doenças respiratórias, etc...) causados pela queima de combustíveis fósseis, a qual é responsável por 98% das emissões

de carbono. Contudo, a minimização dos impactos ambientais deve ser criteriosamente avaliada, juntamente com a viabilidade econômica, quando se propõe novas tecnologias (TORQUATO, 2016).

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo geral demonstrar a viabilidade técnica, ambiental e econômica de se aproveitar lodos gerados nas estações de tratamentos de efluentes da indústria de celulose, queimando-os em caldeira de leito fluidizado borbulhante, evitando o uso intensivo do acondicionamento destes materiais em células de aterro industrial. Estes resíduos são misturados com biomassa oriunda de madeira de eucalipto, mitigando o efeito negativo das taxas de umidade frente ao poder calorífico dos materiais. Objetivos específicos incluem:

- a) Avaliar o impacto na produção de vapor da caldeira de biomassa durante o ciclo deste estudo, com o incremento dos lodos primário e biológico misturados com biomassa de madeira;
- b) Apresentar a caracterização físico-química dos lodos primário e biológico, da biomassa de madeira e das cinzas do processo de combustão;
- c) Analisar as emissões atmosféricas resultantes da queima de biomassa de madeira com adição de lodos da estação de tratamento de efluentes;
- d) Avaliar a viabilidade econômica da inclusão dos lodos na biomassa contra a disposição em aterro industrial.

1.2 A indústria de celulose no Brasil

A cadeia produtiva de celulose representa uma parte expressiva do contexto de base florestal no Brasil, utilizando árvores plantadas, matéria-prima renovável, reciclável e amigável ao meio ambiente, à biodiversidade e à vida humana.

Dados do Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017) mostram que:

a) O Brasil possui 7,8 milhões de hectares plantados de eucalipto, pinus e demais espécies para a produção de painéis e pisos de madeira, celulose, papel, florestas energéticas e biomassa, o que representa menos de 1,0% de toda a área do território nacional. O setor brasileiro de árvores plantadas é um dos segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde.

b) No Brasil, o setor florestal é o que mais protege áreas naturais, tendo quase 6 milhões de hectares destinados a conservação, somando-se as áreas de restauração, áreas de Preservação Permanente (APPs), áreas de Reserva Legal (RL) e áreas de Reserva Particular do Patrimônio

Natural (RPPN), que contribuem diretamente para a conservação da biodiversidade, promove o desenvolvimento econômico e social das comunidades no entorno dos plantios e das fábricas.

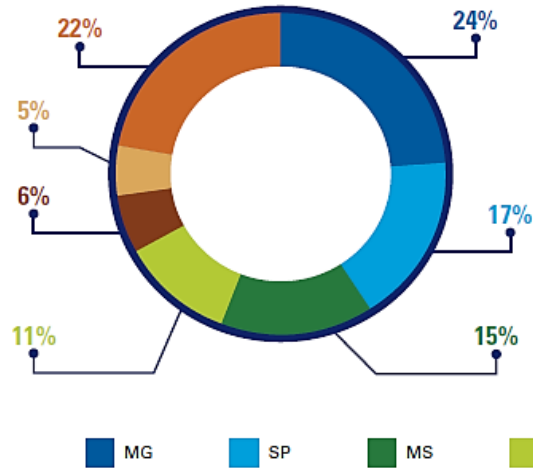
c) No Brasil, 5,4 milhões de hectares são certificados na modalidade manejo florestal. Essas certificações são atribuídas por organizações independentes, como o *Forest Stewardship Council* (FSC) e *Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes* (PEFC), representado no Brasil pelo Programa Nacional de Certificação Florestal (CERFLOR). Os plantios de eucalipto ocupam 5,7 milhões de hectares da área de árvores plantadas do País e estão localizados, em Minas Gerais (24%), em São Paulo (17%) e no Mato Grosso do Sul (15%). Nos últimos cinco anos, o crescimento da área de eucalipto foi de 2,4% ao ano (a.a.). O Estado do Mato Grosso do Sul tem liderado esta expansão, registrando um aumento de 400 mil hectares neste período, com uma taxa média de crescimento de 13% a.a., conforme mostra a Figura 1.

d) Em 2016, o Brasil liderou o *ranking* global de produtividade florestal, com uma média de 35,7 m³/ha ao ano para os plantios de eucalipto e 30,5 m³/ha ao ano nos plantios de pinus, de acordo com as informações reportadas pelas principais empresas do setor, conforme demonstra a Figura 2.

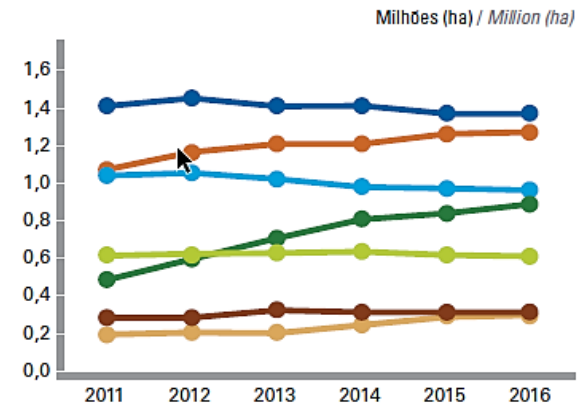
e) Em 2016, a produção brasileira de celulose, considerando o processo químico de fibra curta (eucalipto) e longa (pinus) e a pasta de alto rendimento, foi de 18,8 milhões de toneladas, montante 8,1% superior ao de 2015. O volume exportado atingiu 12,9 milhões de toneladas, representando um incremento de 11,9% em relação ao ano anterior. Considerando a importação de 360 mil toneladas, o volume consumido no mercado interno atingiu 6,3 milhões de toneladas, ficando praticamente estável em comparação a 2015. Com esses resultados, o Brasil subiu duas posições no *ranking* de produção e consolidou-se no mercado mundial da *commodity*. A Figura 3 demonstra este perfil de produção.

Figura 1 - Perfil geofísico da distribuição de florestas plantadas de eucalipto no Brasil.

Distribuição em 2016 / Distribution in 2016

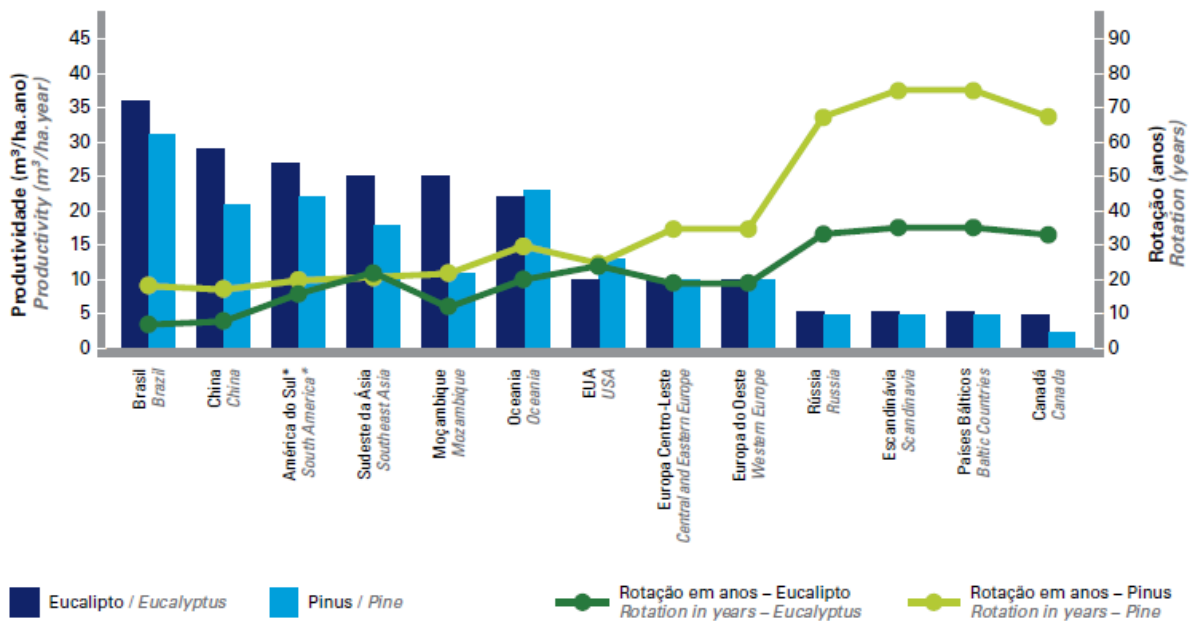


Evolução da área, 2011-2016
Change in area, 2011-2016



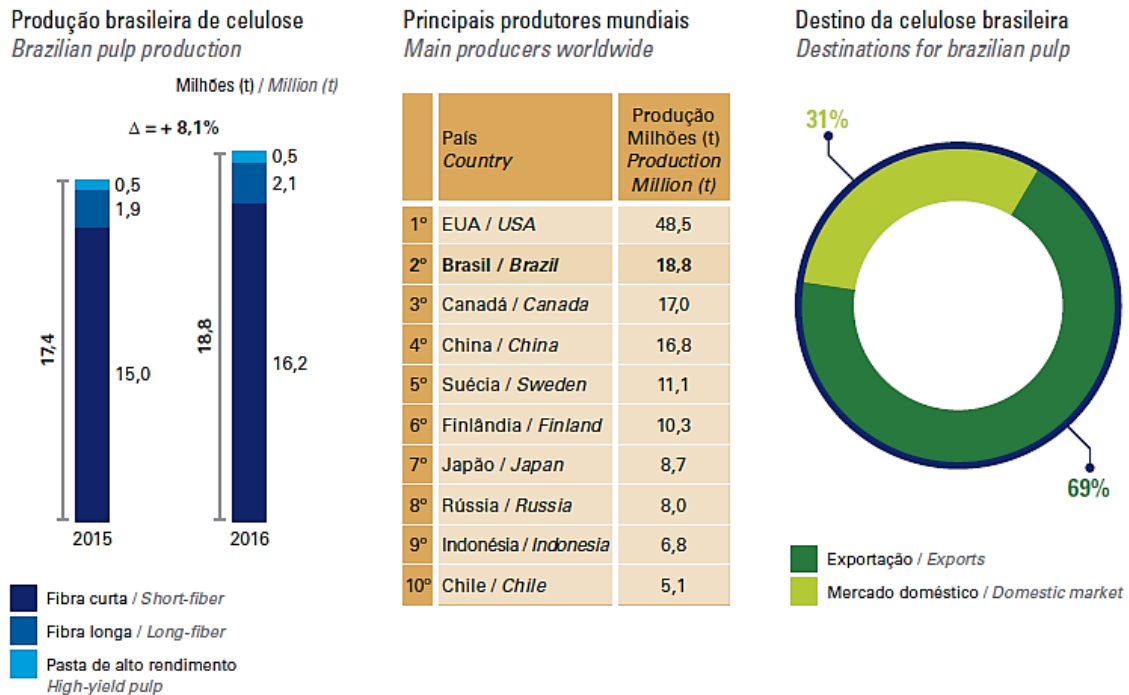
Fonte: Dados do Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017).

Figura 2 - Produtividade e rotação do setor florestal brasileiro x outras regiões do mundo.



Fonte: Dados do Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017).

Figura 3 - Produção brasileira de celulose.



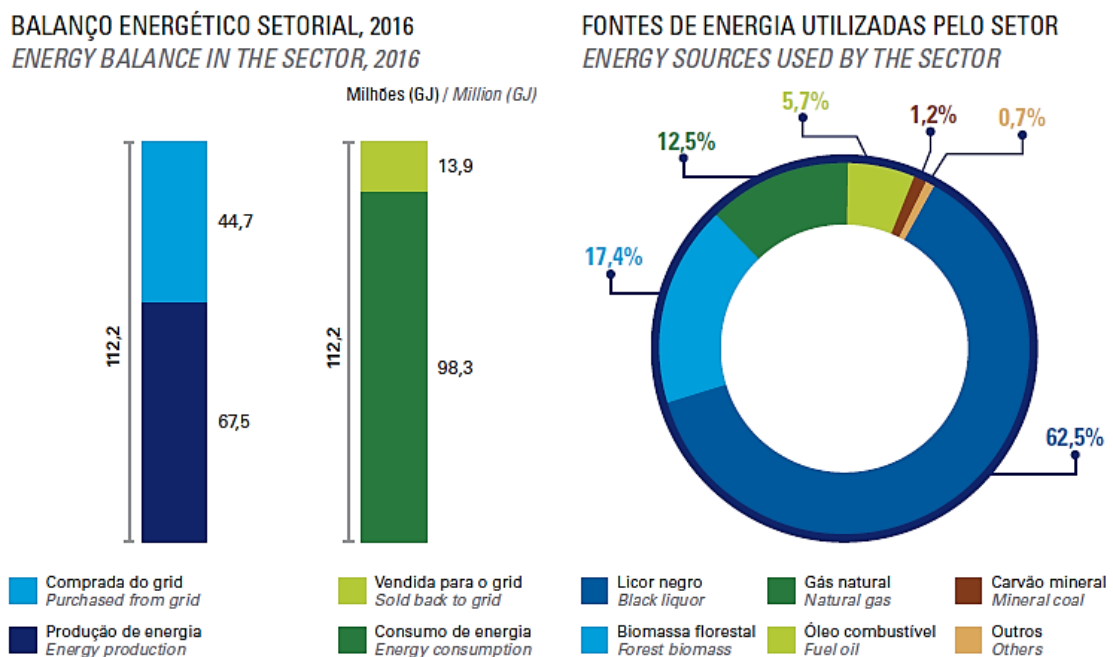
Fonte: Dados do Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017).

Dados do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2016), mostram que num futuro próximo, com a utilização de tecnologias mais avançadas de produção, possa se aproveitar o máximo possível da floresta, possibilitando novos usos da biomassa, como a lignina, o etanol de segunda geração, uma nova geração de bioplásticos, nanofibras e óleos. Assim, as árvores serão, também, provedoras de matéria-prima para outros segmentos produtivos, dentre eles as indústrias: automobilística, farmacêutica, química, cosmética, aeronáutica, têxtil e alimentícia.

Com o conceito de biorrefinaria, a cadeia da indústria florestal abre oportunidades objetivando tecnologias que possam substituir derivados do petróleo. Utilizando os principais componentes da madeira é possível atender: a fabricação de termoplásticos moldáveis, fundíveis e mais resistentes, a partir da lignina; a substituição do Diesel por bio-óleo, pela pirólise da madeira; o aumento da eficiência produtiva e a consequente redução de custos na produção de etanol de segunda geração; a utilização do *tall oil*, resina extraída das madeiras de fibras longas ou *Softwood*, na composição de revestimentos de superfícies, produtos asfálticos, desinfetantes e detergentes, dentre outros; a produção de bioplásticos mais leves, renováveis e resistentes do que os polímeros convencionais; e, também, a produção de suplementos alimentares, cosméticos, embalagens e cimento de alto desempenho a partir de nanofibras ou nanocelulose (CGEE, 2016).

Diferentemente de outros setores econômicos do Brasil, a indústria de árvores plantadas é responsável por gerar a maior parte da energia consumida nos seus processos produtivos. Em 2016 houve um aumento de 3,7% na produção de energia em relação ao ano anterior, tendo sido gerados 67,5 milhões de GigaJoules (GJ), ou seja, 69% dos 98,3 milhões de GJ que foram consumidos pelo setor. As fábricas de celulose mais modernas, além de autossuficientes em energia, geram excedentes para comercialização. Cerca de 13,9 milhões de GJ foram vendidos para a rede pública em 2016. As empresas do setor utilizam quase que exclusivamente subprodutos de seus processos para a geração de energia térmica e elétrica. O licor negro, proveniente da produção da celulose, e a biomassa florestal representam 62,5 e 17,4%, respectivamente, de toda energia produzida. A Figura 4 demonstra esta distribuição (IBÁ, 2017).

Figura 4 - Produção e consumo de energia da indústria florestal.



Fonte: Dados do Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2017).

Em 2016, o setor gerou 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo que, desse total, 33,7 milhões (70,5%) foram gerados pelas atividades florestais e 14,1 milhões (29,5%) pelas atividades industriais. Na atividade florestal, 99,7% dos resíduos sólidos, principalmente cascas, galhos e folhas, são mantidos no campo para proteção e fertilização do solo. Na indústria, 66,0% dos resíduos são destinados à geração de energia por meio da queima em caldeiras, que geram vapor e, eventualmente, energia elétrica para o processo produtivo, minimizando a utilização de combustível fóssil (IBÁ, 2017).

Materiais disponíveis nos diversos processos industriais contendo fontes concentradas de carbono vêm sendo estudados e utilizados para a produção de energias térmica e elétrica, sendo defendidos cientificamente com o objetivo de reduzir descartes como resíduos, evitando passivos e impactos ambientais. Assim sendo, sistemas de cogeração, configuram uma das tecnologias mais racionais para a utilização destes materiais, caracterizando-os como biocombustíveis e evitando o incremento de passivo ambiental.

A utilização racional destes materiais está associada a alguns critérios de controles, com relação a: caracterização físico-química, por análises elementar e aproximada; potencialidade para a queima, pela determinação de poder calorífico e estudo do comportamento térmico frente à combustão (meio oxidante) e pirólise (meio inerte); emissões atmosféricas relativas a compostos químicos referenciados pelas normas, regras e legislação correlatas de organismos oficiais ambientais, obedecendo os limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de sistemas de tratamento térmico de resíduos; e, por fim, quanto a caracterização química das cinzas geradas pela sua queima, considerando os potenciais impactos e a destinação final (BORGES, 2008).

Além dos critérios técnicos, Campregher (2005) comenta que, com o advento do desenvolvimento tecnológico, o número de indústrias no mundo vem crescendo a cada dia e, conseqüentemente, a quantidade de lodo e resíduo gerados também cresce. A maior parte destes materiais tem destino incerto e, na maioria das vezes, ficarão expostos no meio ambiente, provocando contaminações de áreas e, muitas vezes, atingindo corpos receptores de águas. Este problema é comum em várias partes do Brasil e do mundo. Porém, atualmente, com novas leis de proteção ao ambiente e a progressiva implantação de exigentes diretrizes na gestão de lodos e resíduos para as sociedades industrializadas, com perspectivas de um desenvolvimento mais sustentável, faz-se necessário desenvolver métodos alternativos e eficazes para se evitar o simples descarte destes resíduos em aterros industriais/sanitários.

A Fibria (atual Suzano), através do seu relatório anual 2017, apresentou dados expressivos de produção, observando que é uma empresa brasileira de base florestal, líder mundial na produção de celulose de eucalipto, e que opera em 257 municípios do país e exporta para 38 países. A empresa possui 1.056 mil hectares de atividades florestais, sendo que 363 mil hectares são destinados à conservação, e 91% da produção de celulose é destinada à exportação.

Em suas quatro unidades industriais foram produzidas em 2016 5,02 milhões de toneladas de celulose, sendo que nesse total está somada a produção da Veracel no estado da Bahia (operação conjunta da empresa com a Stora Enso), com volume igual a 0,549 milhão de toneladas de celulose; a produção da Fibria (atual Suzano) no estado do Espírito Santo,

responsável por 2,207 milhões de toneladas, com uma porcentagem de energia renovável igual a 92%; a produção da Fibria (atual Suzano), unidade de Jacareí no estado de São Paulo, responsável por 1,028 milhão de toneladas, com uma porcentagem de energia renovável igual a 85%; e, por fim, a produção da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas no estado do Mato Grosso do Sul, responsável por 1,236 milhão de toneladas, com uma porcentagem de 89% de energia renovável.

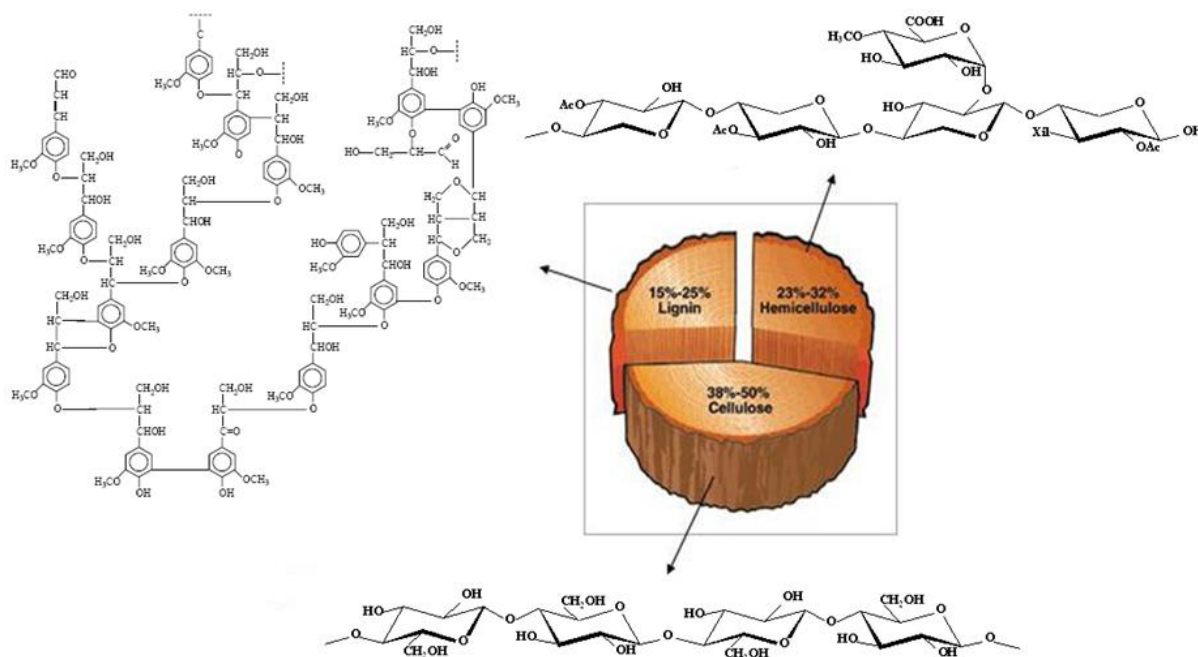
Com a implantação de uma nova fábrica, a unidade de Três Lagoas passará a produzir 3,200 milhões de toneladas de celulose e 85% dos resíduos gerados serão destinados à queima na caldeira de biomassa. Esta Unidade industrial realiza a queima de lodo biológico em sua caldeira de biomassa, misturando com resíduos de madeira numa proporção de 40 e 60%, respectivamente. No ano de 2016 a Unidade de Três Lagoas gerou aproximadamente 47.000 toneladas de lodos, sendo que 40.000 toneladas foram queimadas na caldeira de biomassa. A meta da empresa até 2025 será de reduzir em 91% a quantidade de resíduos sólidos industriais destinados a aterros próprios e/ou de terceiros.

1.3 O processo de produção de celulose *Kraft*

A indústria de celulose é caracterizada como fornecedora de matéria prima para diversos seguimentos de papéis (embalagens, impressão, escrita, cartões, *tissues* e especiais); para a produção de energia térmica e elétrica, para outros seguimentos industriais, como o alimentício, farmacêutico, têxtil, automotivo, indústrias químicas (explosivos, celofane, acetato de celulose, carboximetilcelulose, por exemplo); e, mais recentemente, como fonte de produção de biocombustíveis através da síntese química para o “etanol de 2ª geração ou etanol-celulósico”, do bio-óleo e de outros produtos, dentro dos conceitos de biorrefinaria.

O processo *Kraft* atualmente é o mais importante processo produtivo para extração de celulose de madeiras. O objetivo da cadeia produtiva de celulose é o de efetuar o processo de desconstrução da madeira, separando seus constituintes principais, carboidratos, ligninas e extrativos, utilizando a melhor tecnológica disponível, agregando valor aos negócios e, obedecendo aos critérios dos pilares da sustentabilidade. A Figura 5 evidencia a distribuição dos principais constituintes químicos da madeira, simbolizado em um corte do tronco da árvore.

Figura 5 - Principais constituintes químicos da madeira.



Fonte: Magaton (2010).

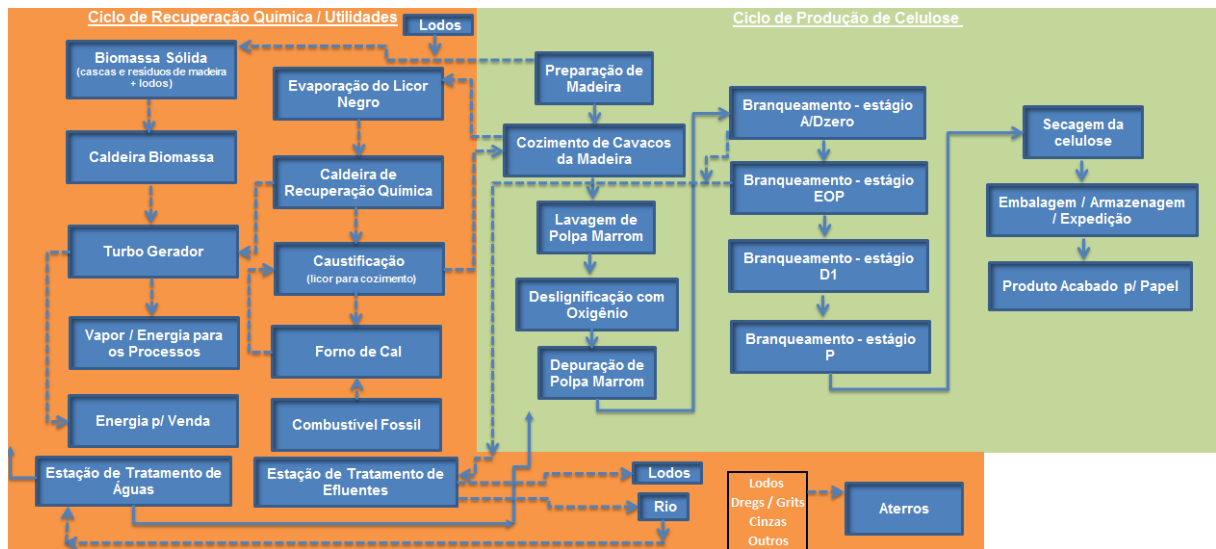
A extração de celulose da madeira teve seu início em 1854, utilizando um processo alcalino, através do uso de soda cáustica como licor e agente de cozimento deslignificante. Em 1884, foi patenteado o processo *Kraft* através da incorporação do sulfeto de sódio na composição do licor de cozimento, juntamente com a soda cáustica, com o objetivo principal de agregar valor qualitativo na polpa celulósica obtida e, também, reduzir o consumo de madeira, através do incremento de rendimento produtivo. Comercialmente foi reconhecido pela primeira vez em 1885, na Suécia, tomando impulso a partir de 1930 e predominando no mercado até os dias de hoje. A palavra *Kraft* é de origem sueca e alemã e significa “força” (resistência), segundo Carreiro (2009).

O processo de extração de celulose, denominado *Kraft*, é caracterizado pela reposição das perdas de sódio, de maneira mais econômica através de *make up* com sulfato de sódio, que é reduzido a sulfeto de sódio após a queima na caldeira de recuperação, recompondo o licor original para o cozimento da madeira.

Este processo tem sua cadeia constituída por subprocessos, que abrange desde as atividades florestais até a logística para a entrega do produto ao cliente.

A Figura 6 apresenta um macro diagrama simplificado das principais áreas desta cadeia.

Figura 6 - Diagrama simplificado da produção de celulose pelo processo *Kraft*.



Fonte: Próprio autor.

As atividades florestais constituem no seu escopo a pesquisa e o desenvolvimento genético da planta, sua adaptação regional, haja vista as características geofísicas específicas, os aspectos silviculturais, o manejo florestal e a logística para o abastecimento à indústria.

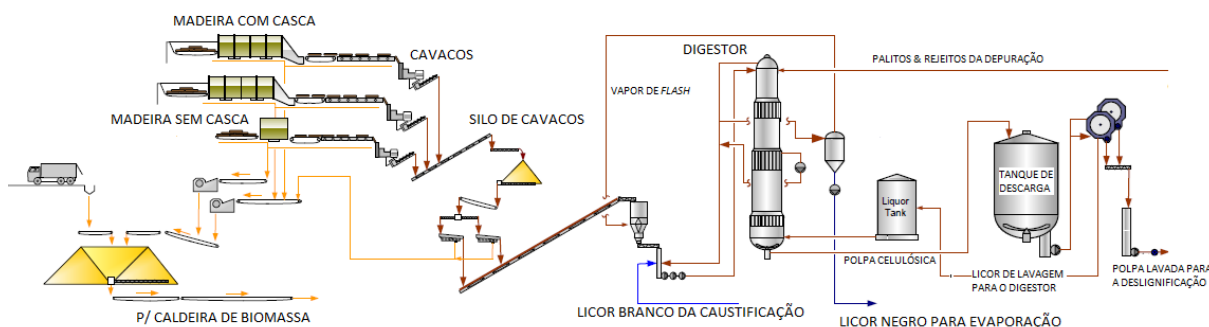
Os processos industriais referentes ao ciclo da produção de celulose são constituídos pelas atividades de preparação da madeira, estocagem, descascamento, limpeza, picagem para transformar as toras de madeira em cavacos para serem estocados em pilhas e, posteriormente, serem classificados em dimensões apropriadas quanto ao comprimento e, principalmente, espessura, objetivando facilitar a melhor impregnação e difusão química do licor empregado para processar o cozimento do material.

No processo de cozimento dos cavacos da madeira são empregadas energias térmica, utilizando-se vapor saturado de baixa e média pressão, e química, utilizando-se de um licor, constituída de soda cáustica e sulfeto de sódio de concentrações controladas, com o objetivo de dissolver e solubilizar a lignina que promove a interação físico-química com as fibras de celulose e hemiceluloses da madeira.

Atualmente, o processo de cozimento utilizado como estado da arte tecnológico é o processo denominado de *low solids* ou baixo teor de sólidos orgânicos dissolvidos no final do cozimento, processo demonstrado eficientemente seletivo, com o qual taxas maiores de rendimentos (relação entre o volume de madeira utilizada por quantidade de carboidratos obtidos no final da cadeia) são atingidas. Fábricas construídas nos últimos 15 anos, e que utilizam este processo, chegam a 54% de rendimento, contra 50% em processos utilizados

anteriormente aos anos 2.000. A Figura 7 apresenta um diagrama simplificado do processo de cozimento *Kraft*.

Figura 7 - Diagrama simplificado do processo de cozimento *Kraft*.



Fonte: Adaptado de Critérios e Dimensionamento Básico – Projeto Horizonte (2007).

O aspecto rendimento da madeira para a extração da celulose é extremamente representativo quando o enfoque diz respeito à engenharia financeira do negócio, haja vista que a madeira é o item de maior impacto no custo da produção de celulose, respondendo por aproximadamente 50% do valor.

O produto do cozimento dos cavacos de madeira é uma polpa fibrosa em suspensão com licor preto, constituída de fibras de celulose, hemiceluloses, resíduos de lignina, ácidos hexenurônicos, ácidos graxos e minerais, sendo que, com exceção dos carboidratos (celulose + hemiceluloses), os demais compostos são responsáveis pela coloração marrom escura, denominados de grupos cromóforos, os quais serão tratados e removidos nos processos posteriores.

Após o processo de cozimento, a polpa celulósica passa por processos de lavagem, deslignificação com oxigênio e depuração da suspensão fibrosa, complementando o circuito denominado de tratamento marrom; no qual os materiais são divididos em três vetores produtivos:

a) Primeiro vetor: onde todos os fluxos hídricos oriundos de lavagens em contracorrente com condensados limpos e água quente serão recuperados, constituindo os materiais orgânicos dissolvidos e os materiais inorgânicos residuais (oriundos da fase de cozimento), portanto sem geração de efluentes hídricos nestas etapas;

b) Segundo vetor: a suspensão fibrosa passa por um processo onde aproximadamente 40% da concentração dos grupos cromóforos residuais, oriundos da seção de cozimento são

reduzidos, função exclusivamente do efeito oxidativo do oxigênio em meio alcalino (processo denominado de pré-deslignificação com oxigênio ou pré-branqueamento);

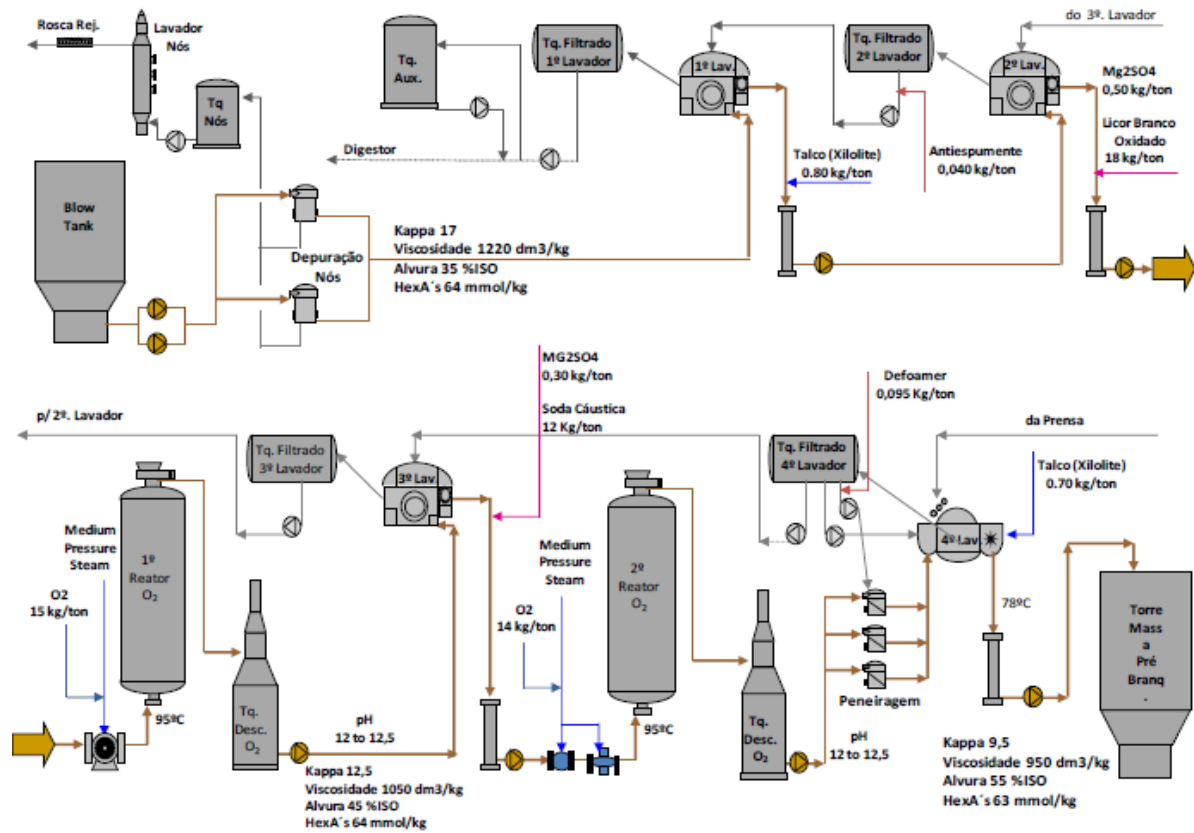
c) Terceiro vetor: os rejeitos dos cavacos de madeira quimicamente não processados durante o cozimento, materiais grosseiros não fibrosos, areia, etc..., são retirados do circuito produtivo, descontaminando o produto destas impurezas, e a suspensão fibrosa lavada, pré branqueada e depurada, está pronta para os processos sequenciais.

Outro aspecto de significância financeira acontece ainda na etapa marrom do processo, haja vista que boas eficiências de lavagem minimizarão as perdas de produtos químicos (base sódio) que terão que ser repostas para se manter o balanço da necessidade de álcalis da fábrica.

Sistemicamente, a eficiência de perdas de sódio ou perda alcalina é medida como perda de sulfato de sódio por tonelada de celulose produzida. Historicamente, bons números apontam para valores abaixo de 14 kg de sulfato de sódio por tonelada de celulose produzida. Portanto, quando descontroles acontecem, além de se perder soda cáustica, também se aumenta o consumo de produtos químicos e insumos nos processos posteriores de branqueamento. A Figura 8 apresenta o *layout* dos processos de lavagem, deslignificação e depuração de massa marrom.

Após a depuração da celulose marrom, inicia-se o processo de branqueamento, que é composto de estágios ou sub processos, os quais oxidam e extraem por dissolução os grupos cromóforos residuais das etapas anteriores; cada estágio finaliza com lavagem através de águas dos estágios posteriores, água quente e/ou água recuperada do processo de secagem da celulose (subsequente ao processo de branqueamento), sempre em contracorrente ao fluxo mássico da suspensão fibrosa, sendo que o material dissolvido do circuito produtivo e o fluxo hídrico resultante destas lavagens são enviados para as estações de tratamento de efluentes.

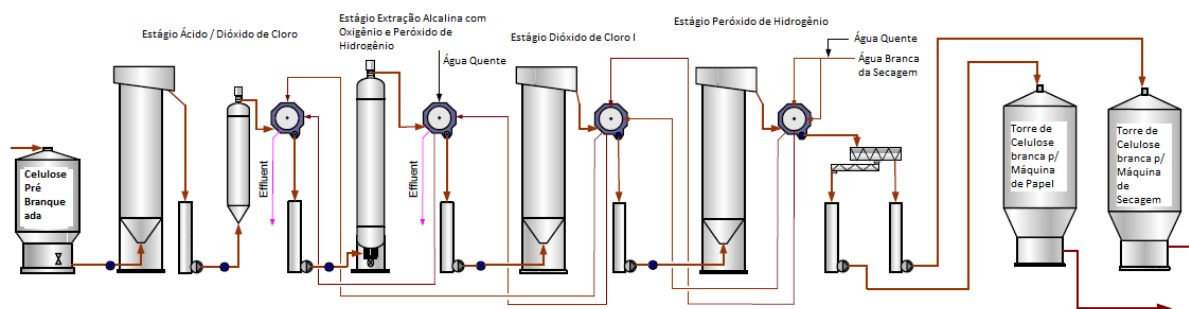
Figura 8 - *Layout* dos processos de lavagem, deslignificação e depuração marrom.



Fonte: Morais (2011).

Com base nos critérios de projeto da Unidade industrial da Fibria (atual Suzano), a planta de branqueamento para celulose *Kraft* de eucalipto, representa o estado da arte em tecnologia e indica para o processo denominado ECF (*Elementar Cloro Free* - livre de cloro elementar), constituindo quatro estágios principais: o primeiro estágio oxidativo com ácido sulfúrico / dióxido de cloro, no qual o foco principal é reduzir a quantidade de ácidos hexenurônicos e ligninas, produtos constituintes do grupo de cromóforos, reduzindo-os para aproximadamente 30% dos valores originais da saída do cozimento; o segundo estágio, uma extração alcalina oxidativa com peróxido de hidrogênio; o terceiro, um estágio de oxidação em meio ácido com dióxido de cloro; e, finalizando, um quarto estágio, com extração alcalina associada com peróxido de hidrogênio. A Figura 9 apresenta um *layout* da linha de fibras e com destaque para o processo de branqueamento.

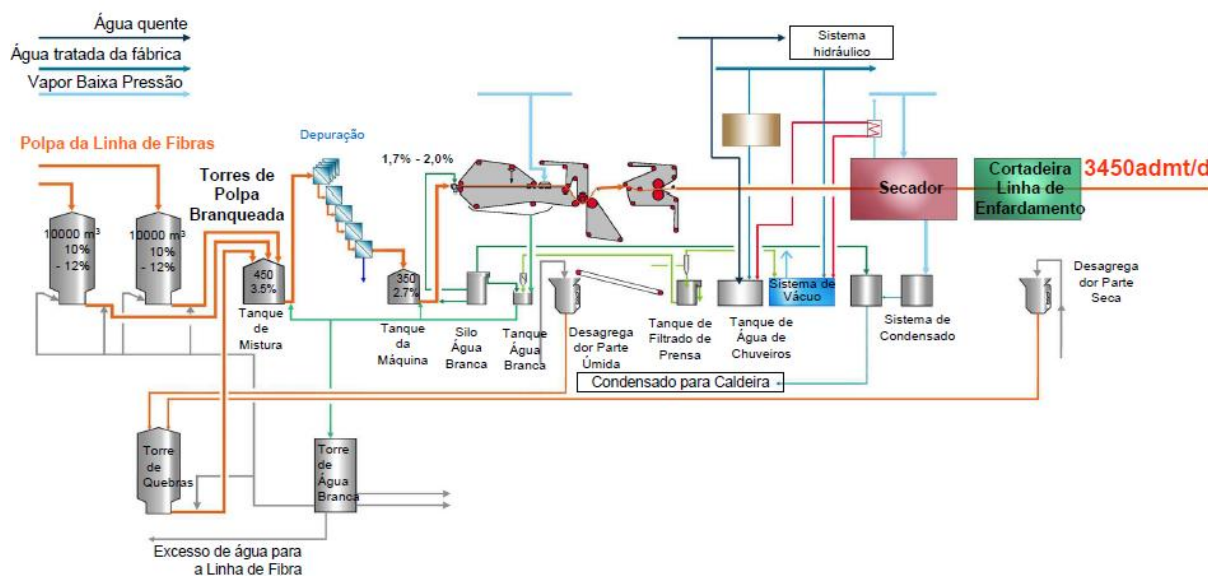
Figura 9 - *Layout* dos processos de branqueamento.



Fonte: Adaptado de Critérios e Dimensionamento Básico – Projeto Horizonte (2007).

Após o processo de branqueamento, e com base nos critérios de projeto da Unidade industrial da Fibria (atual Suzano), a suspensão fibrosa mais uma vez é depurada para limpeza (redução dos valores de sujidade) de materiais não celulósicos remanescente, muitas vezes oriundos de etapas anteriores e/ou aqueles que adentraram aos processos pelos circuitos de águas e/ou adições de produtos químicos. Na sequência acontece a extração de água da suspensão fibrosa que, após ser distribuída em mesa formadora plana, é desaguada por ação hidrodinâmica seguida de aumento do teor seco da folha formada por prensagem mecânica e, finalizando, por ação de secagem através de troca térmica com ar quente, obtendo-se daí um produto com 90% de teor seco de fibras de celulose. A celulose seca é resfriada na saída do secador, cortada em folhas com dimensões projetadas, empilhadas em fardos de aproximadamente 250 kg, os quais são encapados com a própria celulose, amarrados com arames automaticamente, rotulados para identificação e rastreabilidade qualitativa e quantitativa. Por fim, são preparadas unidades de cargas constituídas por oito fardos empilhados, totalizando 2.000 kg, as quais são amarradas e disponibilizadas para armazenamento, logística e expedição. A Figura 10 sintetiza o processo de desaguamento e secagem da celulose.

Figura 10 - Layout do processo de secagem da celulose.



Fonte: Adaptado de Critérios e Dimensionamento Básico – Projeto Horizonte (2007).

Com base nos critérios de projeto da Unidade industrial da Fibria (atual Suzano) em Três Lagoas (MS), o resultado final do branqueamento e secagem é a polpa celulósica com características qualitativas para mercado expressas como: alvura, de valor aproximadamente igual a 90% ISO, resultado da remoção quase que total dos grupos cromóforos, com valores residuais inferiores a 5% do valor medido destes grupos na polpa celulósica de descarga do digestor, medidos através de reversão de alvura; a maior preservação possível de carboidratos (celulose + hemiceluloses), medidos através da viscosidade intrínseca da suspensão celulósica, com valores aproximadamente iguais a 40% de redução em relação ao valor obtido na polpa celulósica na descarga do digestor; sujidade do produto, medida normalmente na celulose pós-secagem, expressa como área de partículas (mm²) encontradas na folha de celulose por unidade de peso (kg) ou por unidade de área (m²), sendo que para cada de tipo de papel a ser produzido existem critérios definidos quanto ao quesito de aceitação de sujidade, porém, de forma geral, impurezas como plásticos, borracha, materiais metálicos, etc..., são incompatíveis com qualquer tipo de papel a ser produzido, exigindo processos de limpeza (depuração) nas máquinas de papéis para a máxima retirada possível destes inconvenientes.

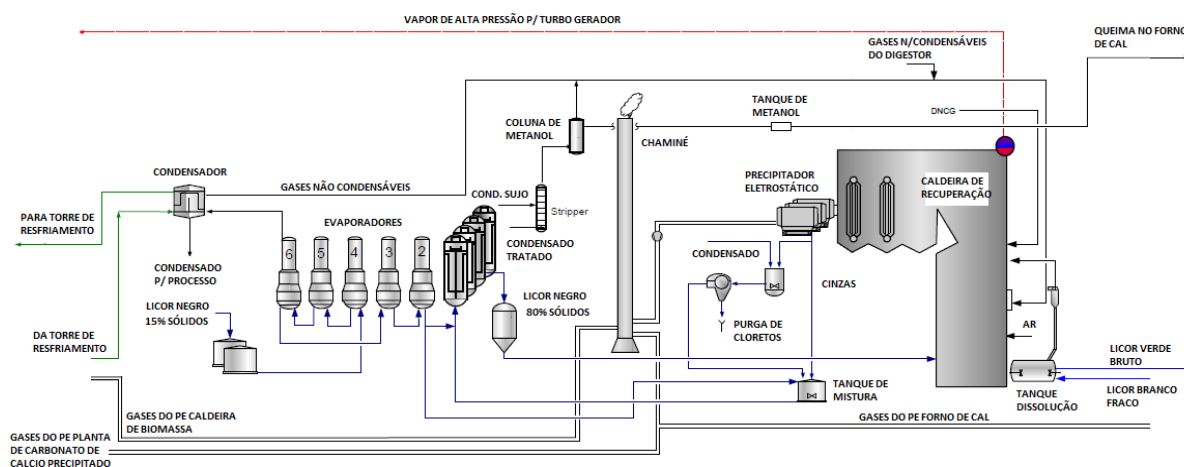
No sentido inverso ao fluxo produtivo da celulose, acontece o fluxo da recuperação química, que significa o vetor de aproveitamento do potencial energético, químico e econômico da indústria de celulose. Sem este ciclo, nos dias atuais, o processo para obtenção de celulose não seria possível de se concretizar, considerando os aspectos ambientais e financeiros.

Como conceito macro, tem-se: a) o aproveitamento da biomassa líquida (licor negro) gerada como subproduto durante o processo *Kraft* de cozimento de cavacos de madeira, para geração de energia térmica e energia elétrica, sendo esta última para abastecer toda a unidade industrial, disponibilizando o excedente para venda; b) a recuperação dos sais de sódio residuais, através dos processos de recaustificação; c) a reposição das perdas de sódio através do *make up* com sulfato de sódio e sua redução química em sulfeto de sódio na caldeira de recuperação, recompondo, assim, o ciclo do licor para o processamento químico (cozimento) da madeira.

Com base nos critérios de projeto da Unidade industrial da Fibria (atual Suzano) em Três Lagoas (MS), o processo de recuperação química se inicia pela evaporação hídrica do licor negro, concentrando a taxa inicial de sólidos de 15 para 80% após este processo. Nestas áreas operacionais acontecem etapas fundamentais da indústria de celulose, onde se separam do licor negro os gases condensáveis e diluídos e, também, os gases incondensáveis, principalmente metil mercaptanas, oriundos das reações químicas acontecidas durante o processo de cozimento no digestor. Estes gases, que são as principais fontes de odores característicos do processo *Kraft* de polpação, são posteriormente queimados no forno de cal e nas caldeiras, mitigando, assim, a problemática de poluição atmosférica em relação aos compostos reduzidos de enxofre.

A massa de biomassa líquida concentrada a 80% de sólidos é queimada em uma caldeira de recuperação química e a massa de material orgânico é convertida em calor e, conseqüentemente, em energia térmica, produzindo vapor d'água que será distribuído para geração de energia elétrica e para suprir a demanda dos diversos processos produtivos. A Figura 11 representa *layout* simbolizando as áreas da evaporação (circuito do licor negro) e da caldeira de recuperação química.

Figura 11 - *Layout* do circuito de licor negro e caldeira de recuperação química.



Fonte: Adaptado de Critérios e Dimensionamento Básico – Projeto Horizonte (2007).

A massa de sólidos inorgânicos do licor negro é fundida na fornalha da caldeira, convertendo compostos de sódio em carbonato de sódio em sua maior concentração; reduzindo o sulfato de sódio em sulfeto de sódio (responsável por aproximadamente 30% de concentração do licor branco de cozimento da madeira na unidade industrial considerada. Estes sais de sódio fundido são recolhidos em tanque e solubilizados, convertendo-se em licor, comumente denominado de “licor verde bruto”.

O licor verde bruto, constituído principalmente por uma solução aquosa de carbonato de sódio e sulfeto de sódio, será filtrado, para retirar impurezas e sais não dissolvidos, e nele será adicionada uma solução de hidróxido de cálcio, que reagirá de forma exotérmica, produzindo hidróxido de sódio e, como subproduto, será gerado o carbonato de cálcio, o qual é retirado do circuito por meio de filtrações e decantações em reatores.

O licor filtrado e decantado, com baixa concentração de carbonato de cálcio, é uma solução aquosa composta principalmente por soda cáustica e sulfeto de sódio, denominado de “licor branco”, o qual será utilizado para as reações de deslignificação da madeira.

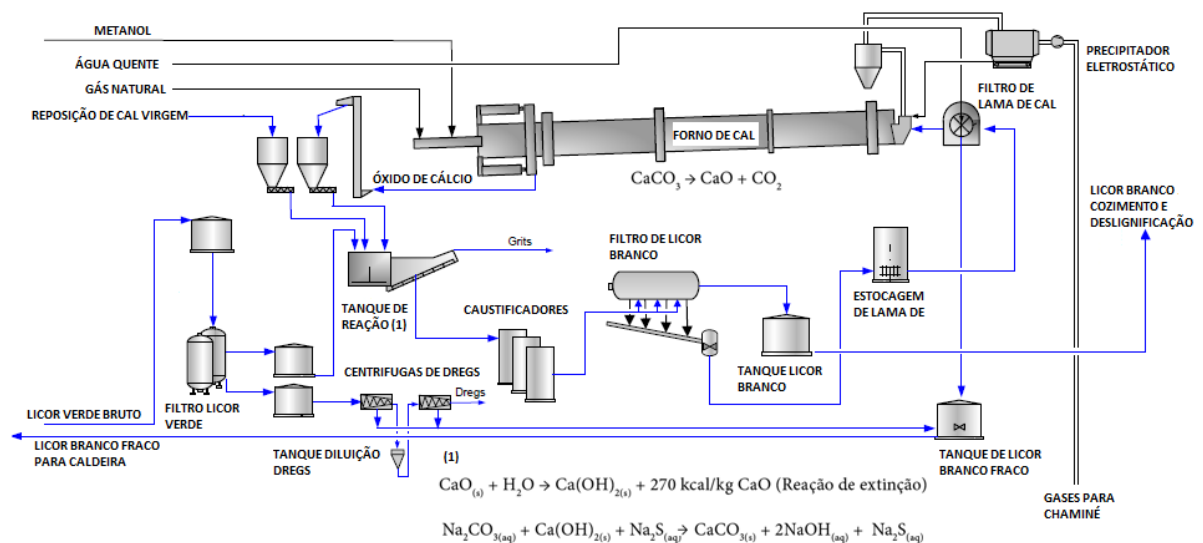
No circuito do licor verde se separa como subprodutos os “dregs”: contaminante indesejável proveniente do tanque dissolvidor de fundidos da caldeira de recuperação química, o qual é composto principalmente por partículas de carbono, além de ferro, alumínio, sílica, cálcio, magnésio e alguns sulfetos.

No circuito do licor branco separam-se como subprodutos os “grits”: porção não reativa da cal, a qual foi adicionada na etapa de caustificação e que contém basicamente sílica e outros compostos inertes, que são utilizados em compostagem para produtos base corretivos de solos nas áreas de plantios florestais.

O processo denominado de “ciclo do cálcio” diz respeito ao aproveitamento do subproduto da caustificação, uma lama com base em carbonato de cálcio, que será lavada para reaproveitar os sais de sódio presentes e reincorporar ao circuito de licor (evitando aumento da perda de sódio). A lama de carbonato de cálcio é calcinada em um forno, convertendo-se em óxido de cálcio, o qual, depois de hidratado, transforma-se em hidróxido de cálcio para utilização na recaustificação do licor verde.

No processo de calcinação da lama de cal, o gás carbônico liberado em função da calcinação do carbonato de cálcio pode ser aproveitado como subproduto em fabricas de celulose que são integradas com fabricas de papel, convertendo-se em carbonato de cálcio precipitado que é um subproduto utilizado como cargas minerais nas receitas da produção de papéis para a linha de escrita e impressão, reduzindo o efeito estufa provocado por estes gases quando enviados para a atmosfera. A Figura 12 apresenta o *layout* das áreas operacionais do forno de cal e da caustificação.

Figura 12 - *Layout* dos processos caustificação e forno de cal.



Fonte: Adaptado de Critérios e Dimensionamento Básico – Projeto Horizonte (2007).

1.4 Cogeração de energia em uma indústria de celulose *Kraft*

O termo “cogeração” é empregado para designar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico (PASSOLONGO, 2011).

Na indústria de celulose, utiliza-se comumente o Ciclo *Rankine*, caracterizado pelo uso de caldeiras aquatubulares de alta pressão, associadas à turbina de extração-condensação e turbina de extração e contrapressão.

O processo *Kraft* enquadra-se dentro do conceito de produção de energia através da cogeração, utilizando como fonte primária de calor, combustíveis de origem renovável oriundo da madeira (biomassa sólida e biomassa líquida), que diferem no aspecto do posicionamento do processo onde são recuperadas para aproveitamento do seu poder calorífico, gerando energia e vapor de extração de média e baixa pressão, utilizados como fonte de energia térmica nos diversos processos produtivos da cadeia de celulose e papel.

De acordo com a ordem relativa de geração de potência e calor, a tecnologia empregada de cogeração, utilizada no estudo em questão, é denominado de ciclo *topping*. Nesse ciclo, os gases de combustão a uma temperatura mais elevada são utilizados para geração de potência elétrica. O calor rejeitado pelo sistema de geração de potência é utilizado para atender os requisitos de energia térmica do processo; assim, esta modalidade de cogeração produz energia elétrica para depois recuperar calor (VELÁSQUEZ, 2000).

O conceito de projeto das plantas modernas de celulose já prevê produção de excedentes de potência elétrica, devido à disponibilidade de combustíveis que podem ser utilizados para incrementar receitas financeiras e reduzir o custo caixa da empresa.

Neste cenário é importante observar que as indústrias de produção de papéis não integradas, ou seja, aquelas que não possuem plantas de celulose e são dependentes do mercado deste produto, normalmente dependem da aquisição de energia de mercado.

A biomassa de origem sólida pode ser oriunda de três processos: 1) da casca que adentra a fábrica juntamente com a madeira; 2) dos resíduos de quebras da própria madeira ao longo do processo de descascamento e materiais considerados finos quando selecionados em peneiras classificadoras de cavacos de madeira e que não atenderiam as especificações de qualidade para a produção de celulose; 3) dos lodos gerados nos tratamentos de efluentes (primário e secundário).

A fonte de combustível base biomassa líquida, é constituída pelo “licor negro”, subproduto originado do processo de cozimento dos cavacos de madeira e que representa aproximadamente 90% da fração do combustível renovável utilizado pela indústria.

O “licor negro” é uma mistura complexa, com aproximadamente 50% de materiais orgânicos e 50% de materiais inorgânicos, sendo que estes valores podem sofrer variações de 2% a 5% em função do tipo de madeira utilizada no processo de cozimento na indústria de celulose (*Softwood* ou *Hardwood*), assim como do tipo do processo (Soda Cáustica ou *Kraft*) e

da tecnologia deste processo (*Compact Cooking, Lo-Solids*, por exemplo). Sua estrutura química macromolecular é normalmente constituída por: a) fração orgânica - ligninas alcalinas, resíduos de carboidratos, ácidos hidroxílicos, ácidos graxos (extrativos), ácido acético, ácido fórmico e metanol; b) fração inorgânica - sais solubilizados de sódio, enxofre e minerais em proporções menores, tais como: potássio, cloro na forma de cloretos, nitrogênio, alumínio, silício, manganês, magnésio, ferro e fósforo (D'ALMEIDA, 1998).

A Figura 13 demonstra um diagrama simplificado da planta de geração de energia térmica e elétrica da Fibria (atual Suzano) da Unidade industrial de Três Lagoas (MS). No contexto é possível verificar que esta planta é composta pelos seguintes equipamentos:

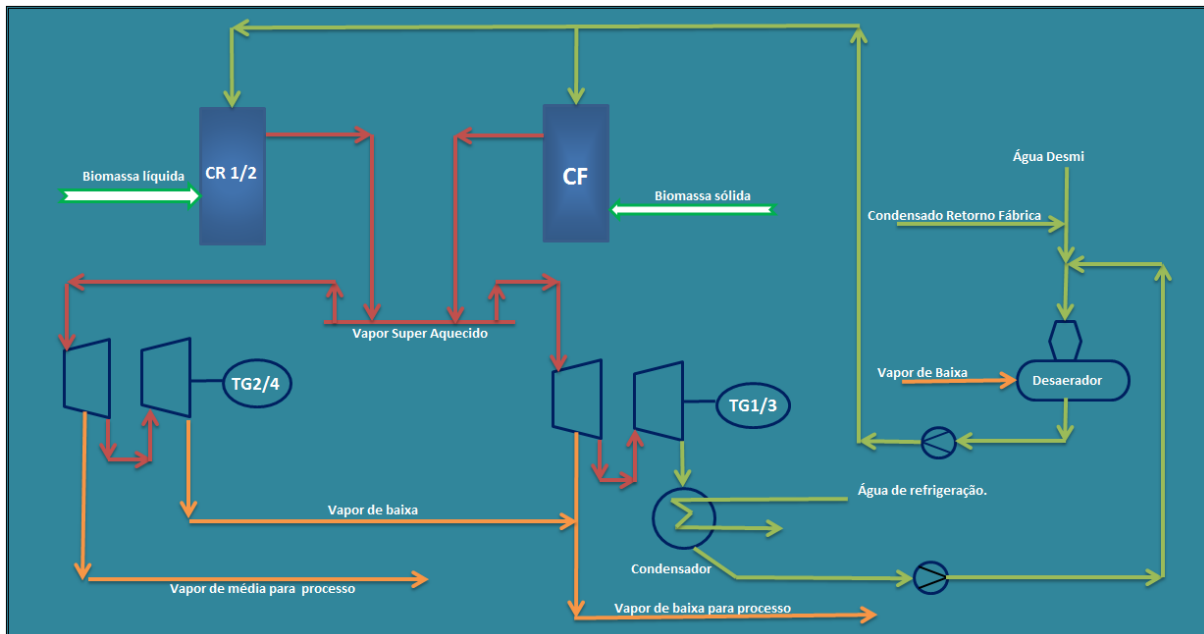
a) Duas caldeiras de recuperação química, uma de fabricação Metso, com capacidade para queimar 5.800 toneladas de biomassa líquida por dia com 82% de sólidos secos, gerar 822 toneladas de vapor com pressão de 86 bar e temperatura de 487°C e outra de fabricação Andritz, com capacidade para queimar 8.250 toneladas de biomassa líquida por dia com 80% de sólidos secos, gerar 1.240 toneladas de vapor com pressão de 84 bar e temperatura de 485°C.

b) Uma caldeira auxiliar, de fabricação Metso (atualmente Valmet), com capacidade para queimar 250 toneladas de biomassa sólida por dia, gerar 150 toneladas de vapor com pressão de 86 bar e temperatura de 487°C;

c) Dois turbos geradores, de fabricação Siemens, denominados de TG1 e TG3, com tecnologia de extração-condensação e capacidades para gerar 81 e 149 MW de potência, respectivamente;

d) Dois turbos geradores, de fabricação Siemens, denominados de TG2 e TG4, com tecnologia para extração-contrapressão e capacidades para gerar 81 e 128 MW de potência, respectivamente.

Figura 13 - Diagrama de uma planta de cogeração de energia em fábrica de celulose.



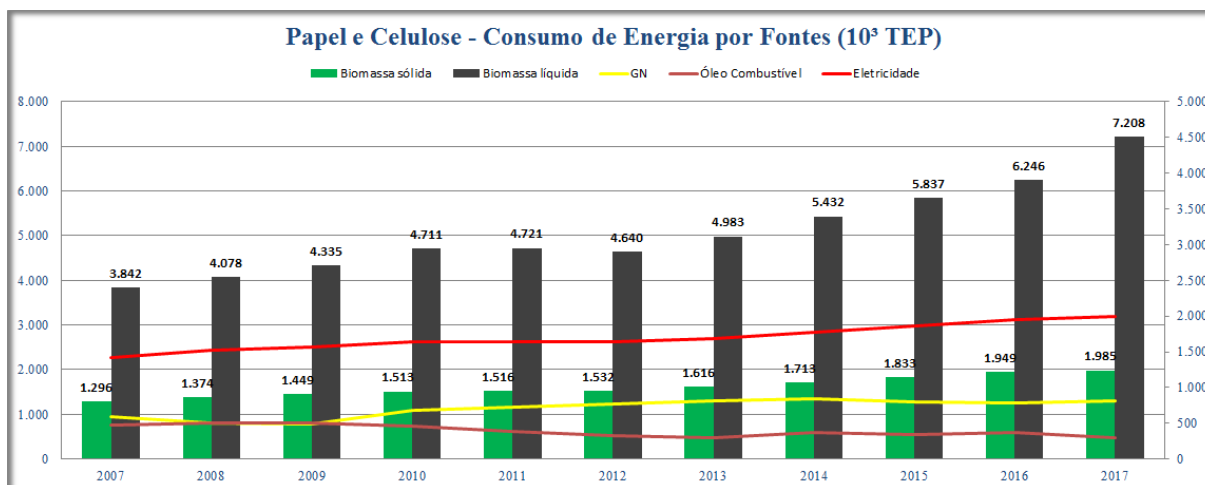
Fonte: Adaptado de informações da planta de utilidades da Fibria (atual Suzano) – MS (2018).

A matriz energética de uma planta moderna de celulose, principalmente aquelas construídas a partir do ano 2.000, apresentam cerca de 96% de utilização de combustíveis de origem renovável, com oportunidade de desenvolvimento para novas tecnologias as quais possam compensar ainda a utilização de cerca de 4% de combustíveis fósseis.

1.5 A indústria de papel e celulose no Setor Elétrico Brasileiro

Segundo dados do Balanço Energético Nacional referente ao ano de 2017 efetuado pelo MME - Ministério de Minas e Energia e pela EPE - Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), o setor de Papel e Celulose apresenta uma distribuição do consumo de energia com base na matriz energética e suas principais fontes, de acordo com o apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Consumo de energia por fontes no seguimento de papel e celulose.



Fonte: EPE (2018).

Observando a Figura 14, nota-se que as principais fontes energéticas da matriz (biomassa líquida, eletricidade, biomassa sólida, gás natural e óleo combustível), representam em média 90%, do total de fontes energéticas utilizadas pelo setor, sendo que as demais fontes (óleo diesel, carvão, bagaço de cana, GLP e outras recuperações) constituem os outros 10%.

Observa-se que a biomassa líquida (licor negro) representa 54% de utilização como fonte energética no seguimento, a eletricidade representa 18%, a biomassa sólida representa 17%, o gás natural representa 7% e o óleo combustível 4%, sendo que este último representava 6% em 2007, declinando ao longo dos anos principalmente face ao crescimento das biomassas líquida e sólida.

É importante informar que este cenário representa o seguimento de Papel e Celulose, incluindo as indústrias de papéis não integradas, dependentes da aquisição de eletricidade.

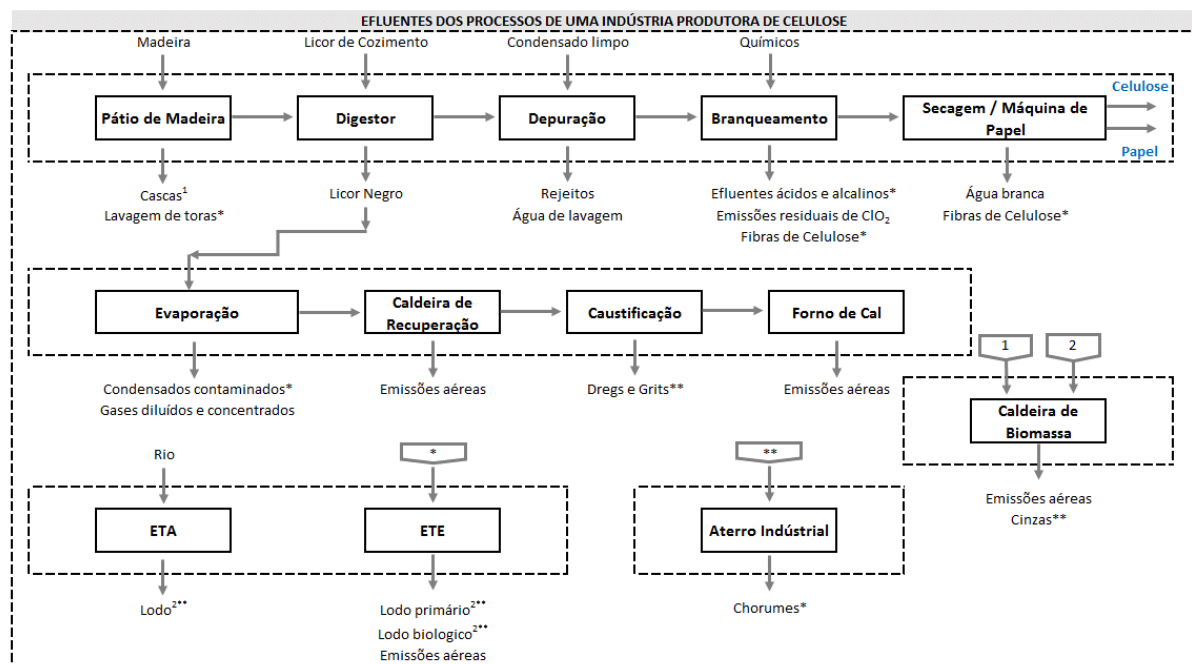
1.6 Aspectos dos lodos gerados na indústria de celulose

As indústrias de papel e celulose geram uma quantidade considerável de água residuária em seus processos. Essa água necessita de tratamento, resultando na produção de um volume considerado de lodo. O lodo da indústria de papel pode ser dividido em várias categorias (BONI *et al.*, 2004): a) Lodo primário, resíduo proveniente da produção de fibras virgens de madeira; b) Lodo de destintamento, resíduo de lodo da produção de papel pós-uso por remoção das tintas das fibras; c) Lodo secundário, o lodo ativado do sistema biológico; d) Lodo combinado, resíduo da produção de celulose / papel com o biológico (lodo ativado).

Além da divisão citada, normalmente os lodos podem ser classificados em três tipos, de acordo com o seu grau de umidade (MACEDO, 2006): a) Lodos secos (maior que 80 % de peso seco); b) Lodos semi-secos (de 30 a 55 % de peso seco); c) Lodos mecanicamente desaguados (de 20 a 40 % de peso seco).

A Figura 15 apresenta um diagrama com as gerações de resíduos, lodos, subprodutos, emissões atmosféricas, característicos da indústria de celulose.

Figura 15 - Fontes e gerações de poluentes da indústria de celulose e papel.



Fonte: Adaptado de Mounteer (2012).

A maior fração dos resíduos sólidos é composta pelo lodo gerado no tratamento de águas residuárias. O lodo biológico é de difícil desidratação e seu tratamento é feito normalmente em várias etapas, inicialmente pelo adensamento e depois pelo condicionamento e desidratação. O teor de sólidos do lodo biológico pode ser aumentado quando ele é misturado com o lodo gerado no tratamento primário, que é rico em fibras de celulose. O lodo misto pode ser desidratado a níveis de 25 a 35% de sólidos secos utilizando-se filtros-pressas e, de 40 a 50%, com equipamento tipo *screw-press*, precedido de pré-tratamento com vapor, segundo Piotto (2003).

Foelkel (2010) cita que lodos são materiais viscosos e úmidos, de aspecto homogêneo, coloração escura, odor específico, composto de matéria orgânica e água em sua maior concentração, sendo gerados nas estações de tratamentos de águas e efluentes dos parques

industriais e de municípios. Comumente se denomina de lodo primário o lodo gerado nas estações de tratamentos de águas e, também, no primeiro processo de retirada de sólidos oriundos dos diversos efluentes setoriais da indústria. No caso específico da indústria de celulose e papel, consiste da retirada de sólidos em suspensão (fibras de celulose na sua maioria), sais minerais, terra, areia, óleo e graxas.

O efluente originado após a primeira barreira física (gradeamento, peneiramento, decantação, filtração, etc...) na estação de tratamentos de efluentes precisa passar por tratamento secundário para que possa retornar ao corpo receptor de águas, de acordo com as características compatíveis exigidas pelos órgãos ambientais. Para o tratamento secundário, a matéria orgânica dissolvida precisa ser convertida em uma fase sólida capaz de ser removida por decantação, filtração, flotação, centrifugação ou outra forma de separação das fases sólidas e líquidas (FOELKEL, 2010).

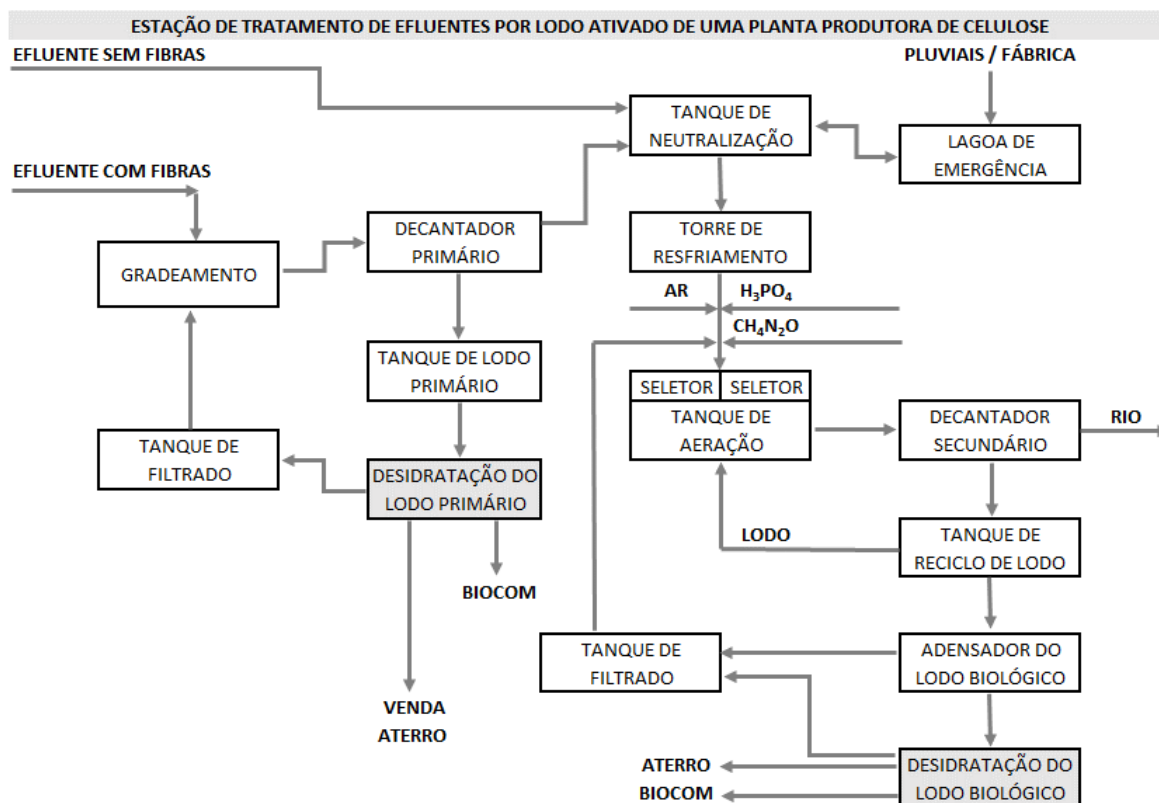
Atualmente o processo mais utilizado para o tratamento secundário é através da conversão biológica, onde microrganismos são utilizados para reduzir o carbono da poluição orgânica. O controle da população microbiológica é realizado pelo monitoramento de lodos, comumente denominados de lodos biológicos.

Um dos grandes problemas para condução operacional dos lodos é sua enorme afinidade pela água. Seus constituintes orgânicos são normalmente hidrofílicos, de granulometria pequena, e requerem alta energia para serem adensados (FOELKEL, 2010).

Os lodos são matérias-primas para outros processos industriais, sendo que no presente estudo é considerado o seu aproveitamento não como resíduo e sim como biocombustível para queima em uma caldeira de biomassa com tecnologia de leito fluidizado borbulhante, deixando de impactar fortemente em ocupação de solo e geração de chorumes através de depósitos em aterros industriais. A Figura 16 apresenta um *layout* de uma planta de tratamento de efluentes de fábrica de celulose com tratamentos primário e secundário.

Foelkel (2010) cita que, de acordo com critérios e aspectos do conceito de produção mais limpa, as indústrias de forma geral, devem ter como premissas importantes: a) Prevenir e controlar desperdícios e perdas nas suas áreas operacionais; b) Reduzir o teor de umidade dos lodos através de melhores técnicas de desaguamento, compactação ou mesmo secagem; c) Reciclar o máximo possível dentro da própria fábrica, ou como fonte de energia, de reuso das fibras, de utilização como materiais para revestimento de terrenos; d) Reciclar externamente comercializando lodos para terceiros e apoiando tecnicamente sua utilização em outros processos; e) Utilizar o mínimo possível aterro industrial e de preferência as formas reduzidas destes lodos (por exemplo: cinzas não compostadas e/ou não comercializadas).

Figura 16 - Layout de Estação de Tratamento de Efluentes de uma fábrica de celulose.



Fonte: Adaptado de informações do tratamento de efluentes da Fibria (atual Suzano) – MS (2018).

Os elementos minerais processuais e iônicos adsorvidos na matéria orgânica dos lodos ou presentes dissolvidos nos próprios efluentes que acompanham os lodos são na sua maioria: cloretos, sílica, sódio, cálcio, sulfatos, carbonatos; os microrganismos biologicamente ativos ou já mortos e presentes como material orgânico residual, sendo em sua maioria: bactérias, fungos, anelídeos, rotíferos, algas, helmintos. Alguns podem eventualmente ter patogenicidade aos seres humanos e animais quando o efluente sanitário for tratado conjuntamente ao efluente industrial. Encontram-se ainda nesses materiais: metais pesados, tolueno, ácidos resínicos, organoclorados, dioxinas e furanos, além de frações oligoméricas de polímeros da madeira (lignina, carboidratos e extrativos).

É possível observar alguns problemas associados aos lodos, que são variáveis na sua magnitude de acordo com o processo produtivo, o tipo de indústria e/ou com os cuidados operacionais (FOELKEL, 2010), a saber: a) Volume e peso para manusear e aterrar; b) Potencial de contaminação ambiental, seja pelo próprio lodo, chorume, percolado, lixiviado, escoamento superficial, e arraste; c) Possibilidades de impactos ambientais por contaminação de lençóis subterrâneos de água, sujeiras perdidas no manuseio, vazamentos e rompimentos de

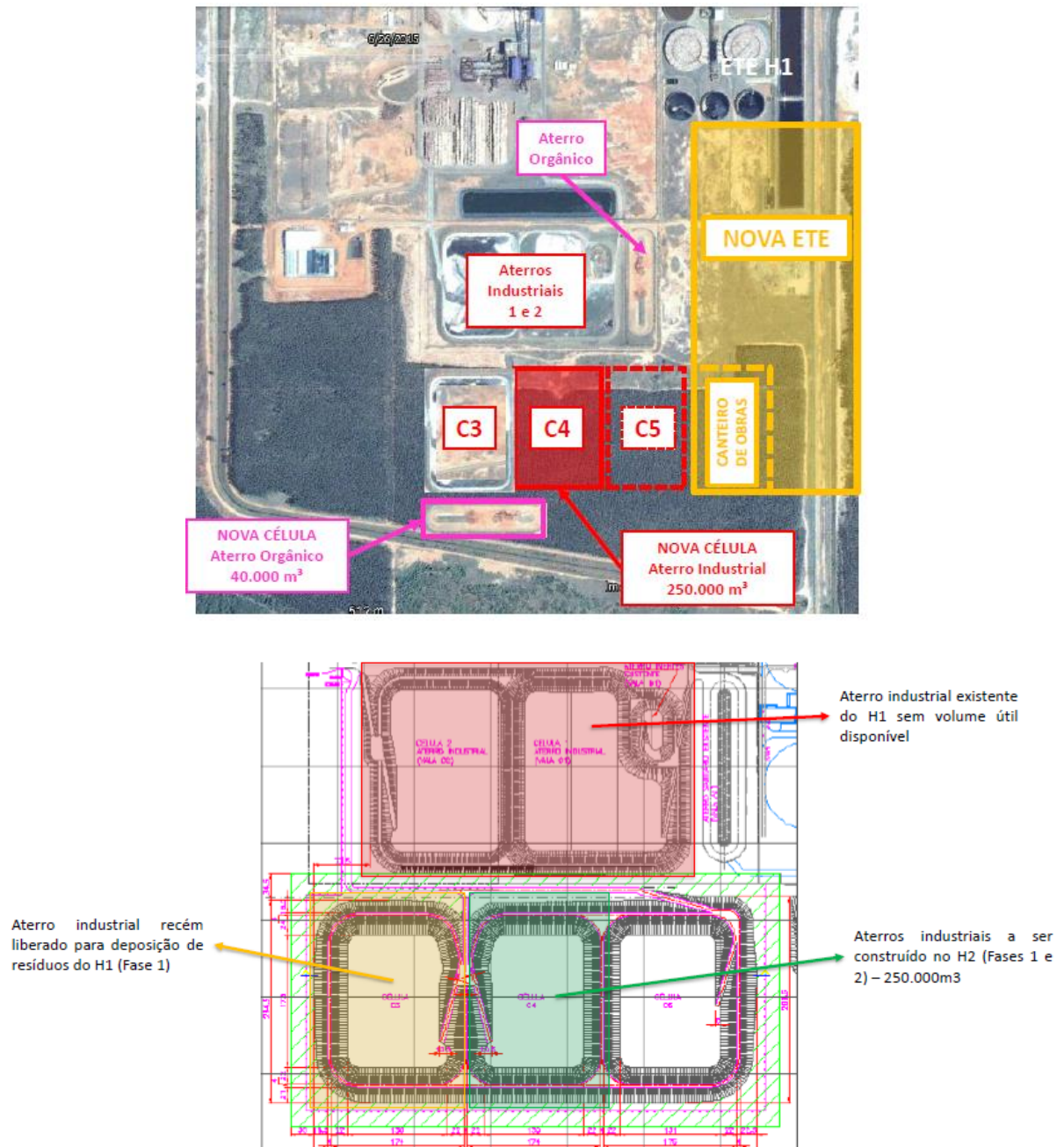
aterros; d) Grandes áreas de terreno necessárias, para as centrais de reciclagem e armazenamento, para a própria disposição em aterros; e) Grandes exigências de cuidados no manuseio e disposição, como impermeabilização de terrenos, veículos especializados, uso de equipamentos de proteção individual; f) Exalação de mau odor em algumas etapas da geração, decomposição e reciclagem; g) Vida útil pequena dos aterros, por maior que sejam eles, envolvendo altíssimos custos de construção.

Com a disposição de lodos em aterros, o processo de reciclagem é descontinuado definitivamente e, em função da constituição física destes materiais (viscosos e úmidos), carecem de outros resíduos mais secos (cinzas da caldeira de leite fluidizado, *dregs / grits*, por exemplo) para promover estabilidade e compactação nos aterros.

A taxa de ocupação de um aterro é influenciada diretamente pela consistência do lodo, sendo que quanto maior for o porcentual de umidade, menor será a sua capacidade de adensamento e, conseqüentemente, maior será o volume necessário do aterro. Esta condição aumentará a geração de chorumes e lixiviados, necessitando, assim, de tecnologia suficiente de impermeabilização das células dos aterros e extração destes efluentes para posterior tratamento. O efluente de aterro possui coloração escura, odor característico de compostos de enxofre e carga orgânica elevada, sendo necessário seu envio para o tratamento de efluentes da planta industrial. O controle operacional dos aterros passa por critérios de verificação e monitoramento contínuos em função dos riscos de contaminação de lençóis freáticos, odores indesejáveis e de explosividade pela formação de gases, sendo regulamentados por normas e legislações específicas, observando que, para a sua liberação construtiva, faz-se necessário estudo de impactos ambientais e solicitação de licenças para sua operação (FOELKEL, 2010).

A Figura 17 apresenta a disposição das células de aterro industrial das fábricas de celulose da Fibria (atual Suzano), unidade de Três Lagoas (MS).

Figura 17 - Disposição das células de aterro industrial da Fibria (atual Suzano) – MS.



Nota: Dados da Fibria (atual Suzano), unidade de Três Lagoas (MS), referentes a 2017.
Fonte: Fibria (2017).

1.7 Caldeira de biomassa com tecnologia de leito fluidizado borbulhante

A Unidade da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS) possui três caldeiras para produção de vapor, sendo duas de recuperação química, que utilizam o licor negro (subproduto do cozimento da madeira para a extração de celulose) como principal combustível; e outra caldeira de biomassa que utiliza resíduos de madeira de eucalipto com lodos como combustível.

A caldeira de biomassa com a tecnologia de leito fluidizado borbulhante é de fabricação Valmet. Sua atual capacidade de produção, após *upgrade*, é de 150 toneladas de vapor superaquecido por hora, considerando as condições de misturas de lodos das Fábricas 1 e 2, misturados com a biomassa de madeira processada na Fábrica 1. Esta caldeira foi construída para operar 24 horas e 354 dias por ano e suas características específicas de produção do vapor são:

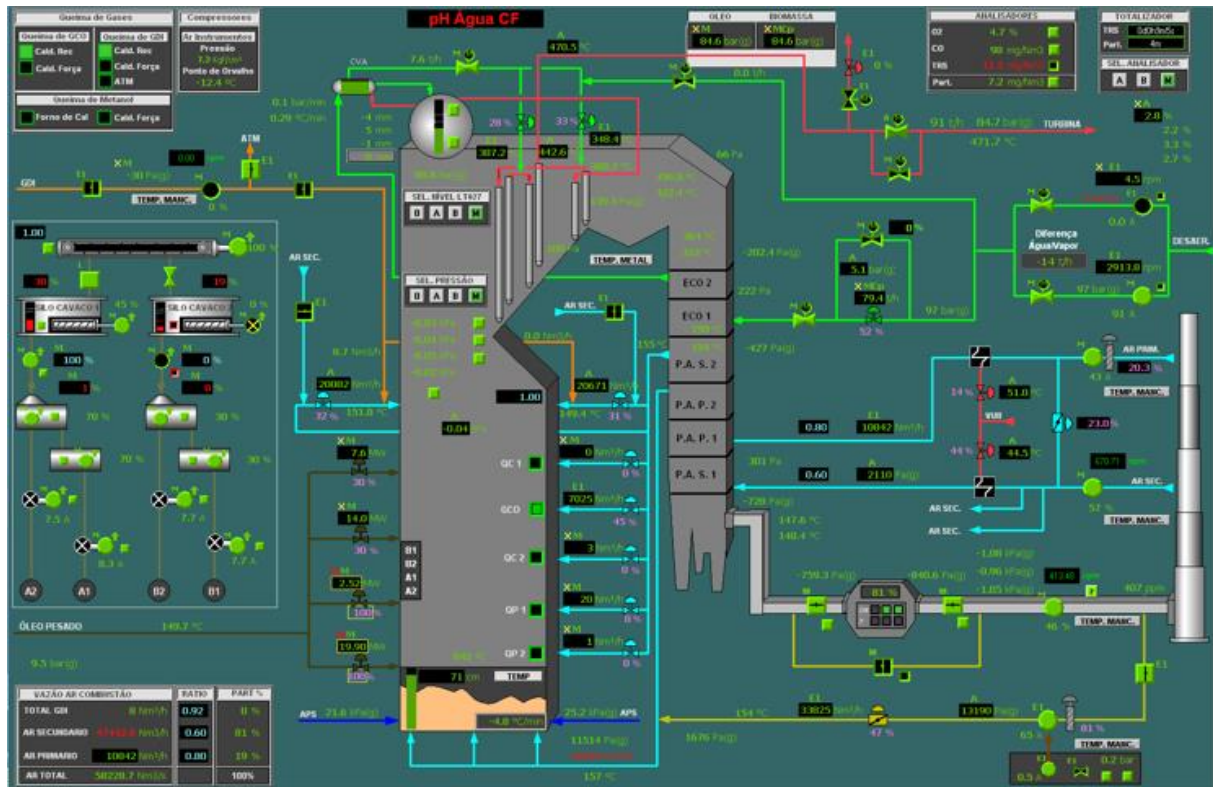
- a) Pressão do vapor na saída da caldeira: 86 bar (g);
- b) Temperatura do vapor na saída da caldeira: 487 ± 5 °C;
- c) Pressão do vapor na entrada do turbogerador: 84 bar (g);
- d) Temperatura do vapor na entrada do turbogerador: 485 ± 5 °C.

Felder (2013) cita que, para uma boa combustão, o combustível deve possuir baixos teores de umidade e cinzas, elevado teor de carbono fixo e de material volátil, além de alto PCS (Poder Calorífico Superior). Quanto maior o teor de Carbono e Hidrogênio, melhor a combustão, enquanto altos teores de Nitrogênio e Enxofre poderão resultar em altos índices de emissões de seus óxidos, como NO_x e SO_x . Adicionalmente, relata que, os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico são: a) materiais particulados, que é uma denominação genérica que engloba a fumaça, fuligem e cinzas; b) óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3), que é um dos piores poluentes existentes nos combustíveis em razão dos aspectos corrosivos, das chuvas ácidas e dos problemas respiratórios que podem causar; c) monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2), que são gases inodoros e sem cor, formados na combustão de qualquer material carbonoso, sendo que o CO é altamente danoso e sua concentração depende muito da temperatura dos gases ou da falta de ar na combustão, sendo o principal gás associado ao aquecimento global; d) óxidos de nitrogênio (NO, NO_2 e NO_3), denominados genericamente de NO_x , que são formados na queima de combustíveis a partir do nitrogênio do ar e dos combustíveis usados. Os inconvenientes dos óxidos de nitrogênio na atmosfera são vários, entre eles: as chuvas ácidas, corrosão em metais e a deterioração da camada de ozônio. As quantidades destes poluentes dependem naturalmente dos combustíveis usados, dos modelos dos equipamentos de queima, do seu estado de conservação e, também, das condições de operação destes equipamentos.

A avaliação técnica do processo de utilização de lodos da estação de tratamento de efluentes líquidos como biocombustível é uma prerrogativa importante dentro dos critérios de sustentabilidade da indústria moderna e pode ser traduzida no âmbito econômico através da justificativa do aumento de vida útil do sistema de aterros industriais, reduzindo grandemente impactos e passivos ambientais futuros.

A Figura 18 demonstra o *layout* da caldeira de biomassa da Fibria (atual Suzano), unidade de Três Lagoas (MS).

Figura 18 - *Layout* da caldeira de biomassa da Fibria (atual Suzano) – MS.



Fonte: Fibria (2017).

Dentre as tecnologias utilizadas para combustão de biomassa, os leitos fluidizados se destacam como os mais vantajosos. Dentre essas vantagens estão o baixo impacto ambiental, a alta flexibilidade do combustível a ser utilizado, o favorável contato gás-sólido, a facilidade de controle e a distribuição homogênea da temperatura e a alta eficiência de combustão devido a elevados coeficientes de transferência de calor e de massa (SILVA, 2011). Este tipo de caldeira é aplicado em grande escala e é frequentemente utilizado para resíduos de madeira e resíduos industriais.

O princípio da caldeira de leito fluidizado baseia-se em uma camada fluidizada de inertes (areia ou material semelhante), onde o combustível é introduzido e queimado. O ar de combustão é insuflado através da camada de inertes, por orifícios abertos na parte de baixo da caldeira. A intensa mistura de partículas assegura que em todo o espaço ocupado pelo leito fluidizado a combustão ocorre sob as mesmas condições favoráveis (mesma temperatura e

quantidade suficiente de oxigênio). As características do estado fluidizado são determinadas de acordo com a velocidade do gás (velocidade de fluidização), segundo Silva (2011).

Os materiais do leito comumente são sílica, dolomite e/ou cinzas do combustível, e geralmente representam 90 a 98% da mistura com o combustível. A temperatura de combustão deve ser mantida baixa (normalmente entre 700 a 940 °C), para evitar a sinterização de cinzas no leito, e depende da qualidade e quantidade do combustível no leito (VALMET, 2015).

Em relação à velocidade de fluidização, pode haver quatro regimes de trabalho no leito: a) leito fixo - uma pequena quantidade de ar flui através do distribuidor de ar para a areia; b) leito fluidizado borbulhante - à medida que o fluxo de ar aumenta ainda mais, bolhas de ar começam a se formar aumentando o volume do leito; c) leito fluidizado turbulento - aumentando ainda mais o fluxo de ar, as bolhas tornam-se maiores e começam a coalescer, formando grandes vazios no leito; d) leito fluidizado circulante - um aumento adicional no fluxo de ar faz com que as partículas saiam do leito e do recipiente. Se os sólidos forem capturados, separados do ar e devolvidos ao leito, eles estarão circulando. Ao contrário do leito de borbulhamento, o leito circulante não tem transição distinta entre o leito denso no fundo do recipiente e a zona diluída acima. A concentração de sólidos diminui gradualmente entre estas duas zonas (SILVA, 2015).

Fatores importantes, que impactam na produção de vapor e no desempenho da caldeira, são a heterogeneidade da mistura de combustível entrando na fornalha, além de variações na umidade e, conseqüentemente, do poder calorífico do combustível; isto certamente impacta no controle ideal da queima, na temperatura do leito da fornalha e nos fluxos de ar e gases de exaustão da caldeira.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da literatura abrange os principais tópicos que estão relacionados ao contexto do trabalho, a saber: lodos gerados em estações de tratamentos de águas e efluentes, seus inconvenientes e destinações orientadas dentro do conceito de sustentabilidade; composição qualitativa dos lodos gerados, da biomassa de madeira e cinzas da combustão destes materiais; potencial técnico da mistura (lodos mais biomassa de madeira) como biocombustível; e, por fim, aspectos das emissões atmosféricas oriundas da queima desta mistura de lodos com biomassa de madeira.

2.1 Lodos gerados em estações de tratamentos de águas e de efluentes, seus inconvenientes e destinações orientadas dentro do conceito de sustentabilidade

Torquato (2016) apresenta os dados mais recentes do Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil, demonstrando que em 2014 foram geradas 215.297 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia, o equivalente, em média, a 1,062 kg por habitante por dia. Na região Sudeste essa relação é ainda maior (1,239 kg por habitante por dia), sendo que os recursos aplicados para a coleta de resíduos sólidos urbanos somaram R\$ 9.420.000,00 ao ano. Em comparação com o ano de 2013, houve um acréscimo de 2,9% na quantidade total destes resíduos gerados, o que não foi um reflexo do aumento populacional, já que a população brasileira apresentou um crescimento inferior a 1,0% no mesmo período.

Makela (2014) cita que as indústrias florestais tradicionais estão tendo que se adequar devido à crescente geração de resíduos e a necessidade do atendimento das regulamentações destinadas à preservação do meio ambiente. Apesar da redução significativa dos impactos ambientais que vem acontecendo nos últimos anos, indústrias que têm a necessidade de processos de tratamento de efluentes continuam sendo uma das principais geradoras de semi-sólidos inorgânicos / orgânicos e resíduos sólidos. A lama de tratamento de águas residuais tem sido incinerada como combustível sólido em caldeiras, porém, as grandes dificuldades são o desaguamento destes sólidos, o conseqüente teor elevado de cinzas após a incineração desses resíduos, e a dependência da utilização de aterros industriais de forma intensiva. Com o intuito de reduzir o volume e aumentar a eficácia do valor calorífico dos materiais gerados, devem ser estudados métodos econômicos e ambientalmente viáveis para aumentar o teor de sólidos secos. Tecnologias usadas para desaguamento de lodo são geralmente operacionalizadas por centrífugas, filtros ou outras máquinas, que, no entanto, são incapazes de remover a água

quimicamente adsorvida e presente nas suspensões de lamas. Portanto, embora a desidratação mecânica tenha sido vista como a maneira mais eficiente em termos de energia para remover grandes quantidades de água das suspensões de lamas, as que são mecanicamente desidratadas apresentam teor máximo de sólidos secos que variam de 18 a 50%. O lodo secundário é geralmente muito mais difícil de desidratar do que o lodo primário e, assim, a maioria das instalações desidrata uma mistura destes lodos. Cita ainda que a principal desvantagem de incinerar mecanicamente lamas desidratadas é seu baixo valor calorífico líquido (2 a 6 MJ/kg) quando comparado com o valor calorífico líquido de casca de madeira (7 MJ/kg) e licor negro (12 MJ/kg), que são os biocombustíveis predominantes em fábricas de celulose e papel. Sistemas de secagem térmica podem ser utilizados para a remoção de ligação intracelular da água nas suspensões de lamas, obtendo-se teores de sólidos secos de quase 95%, mas este processo envolve um grande consumo de energia.

Macedo (2006) cita que foi posta em operação uma caldeira de leito fluidizado borbulhante na fábrica da Fraser Papers em West Carrolton nos Estados Unidos, com o intuito de diminuir os gastos com o manejo do resíduo para aterros, e, também, reduzir poluentes ambientais, pois havia reclamações da comunidade próxima ao parque fabril, devido aos fortes odores e material particulado que vinham deste aterro. O projeto foi concebido para queima de 100% do resíduo da estação de tratamento de efluentes (366 m³/dia), misturado com carvão pulverizado (44,9 t/dia), em caldeira de leito fluidizado borbulhante, com uma produção diária de 27,22 t/h de vapor na temperatura de 400 °C e pressão de 41,4 bar. O lodo de efluente era constituído por fibras de celulose e resíduos de tintas vindo do processo de recobrimento das folhas de papel. Foi utilizada prensa desaguadora para reduzir a umidade de 75 para 50% antes da queima na caldeira, observando que esta tecnologia é apropriada para combustíveis de baixo poder calorífico, juntamente com a mistura com um combustível principal (neste caso o carvão pulverizado) com o intuito de reduzir o consumo final deste.

Imai (2010) cita que o passivo ambiental gerado, o alto custo de transporte, a 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, sendo avaliada e comprovada a viabilidade do uso do lodo da ETE de fábrica de papel *tissue* como combustível para queima em caldeira do tipo grelha rotativa. Nos testes não foram identificados prejuízos à eficiência de geração de vapor com a inclusão de até 15,9% de lodo na composição de biomassa. A avaliação financeira indicou que a queima de lodo pode representar uma economia para a empresa de até R\$ 20.000,00 por mês, sem

prejuízos na produção de vapor e com emissões atmosféricas atendendo as prerrogativas da legislação oficial.

2.2 Composição qualitativa de lodos gerados em estações de tratamentos de águas e de efluentes, da biomassa de madeira e cinzas da combustão destes materiais

Borges (2008) realizou estudos com amostras de lodo doméstico e de indústria têxtil que demonstraram semelhanças na composição elementar para teores de carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H) e enxofre (S), enquanto que a de lodo da indústria de celulose e papel apresentou concentração porcentual de carbono duas vezes maior que as demais. O poder calorífico apresentou valor médio de 19 MJ/kg, independente da composição das amostras de lodo estudadas. Foram realizadas análises termogravimétrica (ATG) e térmica diferencial (ATD), simultaneamente, através do termoanalisador da marca NETZSCH, modelo STA - 409 EP. Através da análise termogravimétrica derivativa (ATD) foi observado que, entre 200 e 600 °C, as três amostras apresentaram comportamento semelhante frente à combustão e pirólise, com significativa liberação de energia. Nas condições de combustão, os resultados da análise termogravimétrica (TGA) mostraram que a amostra de lodo da indústria de celulose e papel apresentou maior estabilidade térmica do que as demais e todas as amostras apresentaram menor porcentagem de cinzas ao final desse processo do que na condição inicial de pirólise, demonstrando a potencialidade energética dos lodos estudados.

Tyagi (2013) cita que resíduos como o lodo ativado é constituído de 59 a 88% (peso / volume) de matéria que é decomponível e produz odores ofensivos. A porção orgânica contém 50 a 55% de carbono, 25 a 30% oxigênio, 10 a 15% de nitrogênio, 6 a 10% de hidrogênio, 1 a 3% de fósforo e 0,5 a 1,5% de enxofre. As cinzas do lodo ativado contém, principalmente, minerais tais como quartzo, calcite ou microlina. Esses minerais são formados por elementos como ferro (Fe), cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg). Além disso, alguns metais pesados, como cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg), também podem ser encontrados no lodo. O potencial de recuperação de energia do lodo é uma função de sua composição, que é uma mistura de matéria orgânica (volátil), matéria inorgânica (material inerte) e água associada.

Torquato (2016) cita que o poder calorífico do lodo seco pode variar entre 12 e 20 MJ/kg, dependendo do tipo de tratamento biológico empregado (aeróbio ou anaeróbio), bem como do processo de estabilização ao qual este resíduo foi submetido. Estes valores são muito relevantes, levando-se em consideração que o conteúdo energético dos carvões minerais varia

em torno de 14,6 a 27 MJ/kg. É interessante notar que o lodo apresenta uma menor razão Oxigênio/Carbono em relação às biomassas lignocelulósicas e um poder calorífico muito semelhante ao lenhito ou carvão marrom, amplamente explorado para a geração de energia a vapor.

Khan (2008) mostrou que a composição da biomassa quanto as taxas de carbono, hidrogênio e oxigênio (CHO) não difere muito entre as diversas fontes de biomassa. Porcentagens de peso típicas (secas) para C, H e O são 30 a 60%, 5 a 6% e 30 a 45% respectivamente. Porém, certos elementos da biomassa merecem atenção especial como, por exemplo, potássio, enxofre, nitrogênio, silício e cloro, sendo este último o que causa mais problemas na unidade de combustão, pois é encontrado em maior proporção. A maior preocupação centra-se na corrosão a alta temperatura de tubos do superaquecedor. O cloro facilita a mobilidade de muitos compostos inorgânicos, em particular o potássio. A concentração de cloro frequentemente dita a quantidade de álcali (potássio) vaporizado durante a combustão, tão fortemente quanto ele dita o transporte de álcalis do combustível para superfícies dos tubos, onde muitas vezes forma sulfatos e promove sérias incrustações e depósitos.

Avelar (2017) apresentou estudos sobre os lodos biológicos oriundos das indústrias de celulose, mostrando que os mesmos eram compostos por Carbono (32 a 48%), Hidrogênio (5,5%), Nitrogênio (3,9 a 6,6%), Enxofre (1,5%) e Oxigênio (25%). O poder calorífico superior apresentou variação entre 11 a 20 MJ/kg e os materiais voláteis apresentaram variações entre 61 a 64%.

Souza *et al.* (2009) realizaram, em laboratório, análise elementar, análise de poder calorífico, cloretos, fluoretos e fósforo, em amostras de cavacos de madeira. Os resultados apresentados como porcentagem média de massa na base seca foram os seguintes: Carbono (50,8%), Hidrogênio (6,7%), Nitrogênio (0,6%), Cloretos (0,01%), Enxofre, Fluoretos e Fósforo não foram detectados. O valor médio do poder calorífico inferior (PCI) encontrado foi igual a 5.554 kcal/kg. O valor médio do poder calorífico superior (PCS) encontrado foi igual a 5.850 kcal/kg e o teor médio de umidade da biomassa foi igual a 42%. Os valores médios do material volátil, de carbono fixo e cinzas foram iguais a 77%, 22% e 1%, respectivamente. Foi certificado que a biomassa com teor de umidade mais alto possui poder calorífico mais baixo e, conseqüentemente, maior dificuldade de queima, e, ainda, que a queima de materiais com presença de cloretos pode apresentar taxas de dioxinas e furanos nas emissões gasosas.

Silva (2015) observou que diferentes fontes de biomassa não apresentam grandes diferenças nas suas composições quanto aos teores de Carbono, Hidrogênio e Oxigênio, sendo

que típicas concentrações percentuais (base seca) são: 30 a 60%, 5 a 6% e 30 a 45%, respectivamente. Observou ainda que as taxas de Nitrogênio, Enxofre e Cloretos, normalmente não ultrapassam, individualmente, o montante de 1,0%, variando de acordo com o tipo de biomassa e sua origem.

Jenkins (1998) observou que o poder calorífico da biomassa de madeira pode ser parcialmente correlacionado com a concentração de cinzas e concentração de carbono. Madeiras com menos de 1% de cinza normalmente possuem valores de poder calorífico perto de 20 MJ/kg. O aumento de 1% nas cinzas promove uma diminuição do poder calorífico em 0,2 MJ/kg, isso porque as cinzas não contribuem substancialmente para o calor total liberado pela combustão. Já a elevação da concentração de carbono nesta biomassa em 1% promove incremento no poder calorífico em aproximadamente 0,39 MJ/kg.

Rodrigues (2010) cita que o teor de cinzas gerado durante a combustão de materiais lignocelulósicos pode variar bastante e depende da composição química do material. A madeira geralmente apresenta menos que 1% em peso, sendo que na casca o teor é maior. Algumas impurezas, devido à presença e contato com o solo, podem aumentar também o teor de cinzas presente na madeira. Observou que a mistura de lodo biológico com os finos de madeira melhorou as características de briquetes em relação à resistência à compressão, expansão linear, absorção de água e densidade aparente. A adição dos finos de madeira diminuiu o percentual de cinzas e proporcionou um aumento na composição elementar de carbono e, conseqüentemente um ganho no poder calorífico superior. A melhor proporção de mistura entre os dois resíduos foi de 60% de lodo para todos os parâmetros avaliados. O percentual de cinzas gerado a partir da combustão dos resíduos foi de 10%, observando que, de acordo com os valores médios da composição elementar em relação a cinzas dos materiais antes da composição do briquete, foi de 28,5% para o lodo biológico, 1,3% para a casca de madeiral, e 0,77% para os resíduos de madeira.

2.3 Potencial técnico de lodos gerados em estações de tratamentos de águas e de efluentes misturados com biomassa de madeira, usados como biocombustíveis

Heiland (2012) estudou a destinação do lodo biológico na fábrica de celulose da Fibria (atual Suzano) em Três Lagoas (MS), observando que o volume de materiais enviados para aterro industrial se situava em aproximadamente 72.000 m³/ano de resíduos sólidos e que o lodo biológico representava 75% deste volume. Foram estudadas quatro alternativas para o lodo biológico: a) manter o sistema de aterro industrial; b) instalar secador térmico; c) queimar o

lodo na caldeira de biomassa; d) utilizar o sistema de compostagem. Para definir a melhor alternativa a ser aplicada, foi utilizada a metodologia que levou em consideração o valor do investimento, o custo de manutenção e o custo operacional do novo sistema. Concluiu que a melhor alternativa para o destino do lodo seria queimá-lo, misturado com a biomassa de madeira de eucalipto na caldeira de biomassa de leito fluidizado borbulhante.

Guaitolini (2014) apresentou um teste da queima de lodo secundário misturado com biomassa de madeira em caldeira de leito fluidizado. Os valores apresentados correspondem à coleta de dados em dois períodos distintos, sendo que no primeiro período houve apenas queima de biomassa na caldeira (controle), e já no segundo período aconteceu a queima da mistura de biomassa e lodo biológico (teste lodo). 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. O valor do teor seco foi reduzido em 23,7% após a mistura do lodo secundário com a biomassa, passando de 65,7 para 50,1%. Foi verificada uma redução do valor médio do poder calorífico para a amostra úmida no período de teste com o lodo biológico. Por outro lado, quando foi medido o poder calorífico para a amostra seca, não foi verificada diferença para as médias das amostras dos períodos distintos, excluindo a interferência da variação do teor seco da amostra. Este resultado mostra o potencial de utilização do lodo biológico na caldeira de leito fluidizado, atentando para o pré-condicionamento da amostra, de forma a reduzir a umidade e, conseqüentemente, aumentar seu teor seco. Durante o período de teste de queima do lodo biológico na caldeira de leito fluidizado não houve efeito negativo na produção de vapor. 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.

Avelar (2017) comentou que, antes de qualquer tentativa de utilização do lodo biológico para a produção de energia, é essencial entender seu comportamento durante a pirólise e o processo de combustão, que podem ser determinados usando análises termogravimétricas (TGA), a qual fornece meios para a avaliação preliminar dos valores combustíveis destes resíduos. Esta informação pode ser usada para prever a eficiência de combustão, o tempo de permanência, o excesso de ar e o tipo de caldeira a ser utilizado, bem como estabelecer condições operacionais ótimas para a combustão, além de conhecimento do comportamento térmico da biomassa. Utilizando um Analisador Termogravimétrico automático de múltiplas amostras TGA-1000, foram analisados o lodo biológico e a biomassa de madeira de eucalipto (cavacos e cascas). Os resultados mostram que a primeira faixa de temperatura (100 a 200°C) foi caracterizada por uma pequena perda de umidade, atribuída à decomposição térmica intracelular e água quimicamente ligada aos materiais. Na faixa de temperatura entre 200 e

300°C a perda de massa pode ser atribuída ao início da decomposição das hemiceluloses, uma vez que este componente se decompõe entre 230 e 390°C. A maior perda de massa observada pode ser devido à presença de extrativos em casca de madeira que se degradam também dentro dessa faixa de temperatura. A maior ação térmica ocorreu na faixa de temperatura entre 300 e 400°C, sendo caracterizada pela degradação das hemiceluloses e, especialmente, da celulose, que se decompõe entre 320 e 380°C. A perda de massa foi maior para os cavacos de eucalipto, do que para cascas ou lodo biológico, isto acontece devido à maior volatilidade e menor teor de cinzas dos cavacos de eucalipto. A decomposição de matéria inorgânica ocorreu principalmente entre 400 e 700°C, além da lenta decomposição da lignina nesta faixa de temperatura. A menor perda de massa observada para o lodo biológico foi esperada devido à elevada quantidade (34%) de matéria inorgânica (cinzas) presente neste material. Os resultados e caracterização dos materiais por TGA mostraram que a adição de biomassa de eucalipto numa proporção de 25%, aumenta a perda de massa, o valor de aquecimento, a matéria volátil, o carbono fixo e o hidrogênio, e diminuiu as cinzas, nitrogênio e enxofre. Portanto, a combustão de misturas com 25% de biomassa de madeira de eucalipto pode fornecer uma opção atraente para a utilização de lodos como fonte de energia renovável.

2.4 Aspectos das emissões atmosféricas durante a queima da mistura de lodos e de biomassa de madeira

Souza (2009) analisou o teor de nitrogênio em lodos de indústria frigorífica e em serragem de madeira, observando que o teor de nitrogênio (N) no lodo frigorífico (8,10%, base seca) é maior do que o encontrado na serragem de madeira (0,21%, base seca). Maiores concentrações de nitrogênio na biomassa resultam em maiores concentrações de óxidos de nitrogênio (NO_x) liberados durante a combustão desse resíduo isoladamente. A temperatura de combustão também influencia a concentração de NO_x formado, sendo imprescindível o seu controle. O lodo da indústria frigorífica apresenta ainda grandes concentrações de enxofre (0,30%) e cloretos (0,16%) em sua composição, por isso, a combustão desse resíduo misturado com a serragem de madeira deve ser monitorada, uma vez que a presença de íons cloreto pode resultar em emissão de ácido clorídrico (HCl) e de enxofre (S) através de seus óxidos (SO_x) quando submetido à combustão e, conseqüentemente, pode ocasionar problemas de corrosão nos equipamentos. Além disso, a presença de cloro contribui para a formação de dioxinas e furanos em processos de conversão térmica, compostos com reconhecido potencial

carcinogênico. Comparado à serragem (0,04%, base seca), o lodo frigorífico apresenta concentração de cloretos consideravelmente mais alta.

Farooq (2017) observou que, em uma caldeira de leito fluidizado borbulhante, os combustíveis são queimados em um leito turbulento de um material sólido inerte, garantindo, assim, alta transferência de calor, excelente mistura gás-sólido e boa eficiência de combustão, com temperaturas de combustão típicas entre 800 e 900°C. Os valores de óxidos de nitrogênio (NO_x), como óxido e dióxido de nitrogênio (NO e NO_2), destas caldeiras, são consideravelmente menores que as caldeiras de combustão com combustível pulverizado, com temperaturas típicas entre 1.300 a 1.700°C. Já as emissões de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono (CO) e particulados, ainda são questões importantes para os sistemas de combustão de biomassa. Combustão de biomassa emite níveis relativamente altos de NO_x e particulados em comparação com os sistemas de combustão com óleo leve ou gás. A avaliação do ciclo de vida (ACV) indica que quase 40% do impacto ambiental de uma caldeira moderna automática com queima de biomassa de madeira é associado a emissões de NO_x .

Guaitolini (2014) estudou a queima de biomassa de madeira de eucalipto misturada com lodo de origem biológica da estação de tratamento de efluentes da fábrica de celulose da Fibria (atual Suzano), em Três Lagoas (MS), notando que a taxa de enxofre total reduzido (TRS), representado principalmente pelos compostos: ácido sulfídrico (H_2S), metil mercaptanas (CH_3SH), dimetil-sulfeto (CH_3SCH_3), dimetil-disulfeto ($\text{CH}_3\text{S}_2\text{CH}_3$), que possuem habilidade de gerar odor mesmo em concentrações extremamente baixas, aumentou devido a inclusão deste lodo para a queima na caldeira, passando de 4,98 para 6,74 ppm. O resultado evidencia um efeito negativo da queima de lodo biológico na caldeira, onde será esperado maior odor, mas, mesmo assim, os níveis encontrados ainda são aceitáveis, de acordo com a resolução do Conama 316:2002. Desse modo, o aumento de TRS não foi fator inviabilizador para a implementação de queima do lodo biológico na caldeira de leito fluidizado.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados e informações

O estudo de caso corresponde ao aproveitamento de resíduos industriais como fonte de biocombustível para queima em caldeira de biomassa efetuado pela Fibria (atual Suzano), Unidade de Três Lagoas (MS), buscando minimizar impactos ambientais quando estes resíduos são dispostos em aterros industriais, obedecendo aos critérios dos organismos ambientais. O escopo desse estudo perfaz a cronologia histórica considerando o ciclo de janeiro/2017 até julho/2018.

As áreas industriais consideradas neste estudo de caso foram:

Tratamento de Efluentes Líquidos (ETE) – Fábrica 1, a partir da disposição do lodo biológico adensado, quantificando a geração, o envio para o aterro industrial e o envio para a queima na caldeira de biomassa; **Fábrica 2**, a partir da disposição do lodo misto adensado (composição dos lodos primário e secundário da ETE mais o lodo primário da Estação de Tratamento de Águas - ETA), quantificando a geração, o envio para o aterro industrial e o envio para a queima na caldeira de biomassa.

Caldeira de biomassa com tecnologia de leito fluidizado borbulhante - comum às duas fábricas. Consideradas as informações da quantificação do consumo de biomassa de madeira de eucalipto / a quantificação da produção de vapor e as emissões atmosféricas no ciclo do estudo.

Dentro do ciclo do estudo de caso, aconteceram fases importantes, as quais podem ser destacadas: a) elevação da capacidade produtiva de vapor da caldeira de biomassa de 120 toneladas por hora para 150 toneladas por hora em março/2017; b) início operacional da segunda fábrica de celulose, aumentando a capacidade produtiva da Unidade industrial de 1,2 para 3,2 milhões de toneladas de celulose por ano em agosto/2017; c) estabilidade operacional da nova fábrica de celulose e a influência da elevação da quantidade de lodos gerados, que somados com a quantidade de lodos gerados da primeira fábrica, elevaram a disponibilidade destes materiais para a queima na caldeira de biomassa, a partir de janeiro/2018.

As informações para a composição do estudo de caso foram coletadas nos bancos de dados gerenciais da empresa, através da disponibilização diária e mensal, compilados em planilhas eletrônicas (Excel) para apresentação de tabelas, quadros e gráficos, sendo que para tratamentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab® 17.2.1.

Dentre os dados e informações da unidade de Três Lagoas (MS) da Fibria (atual Suzano) utilizados neste trabalho podem ser citados os seguintes:

- a) Balanço mensal dos lodos gerados nas ETE's 1 e 2;
- b) Balanço mensal dos lodos enviados para queima na caldeira de biomassa;
- c) Balanço mensal dos lodos enviados para aterro industrial;
- d) Balanço mensal de biomassa de madeira utilizada para queima na caldeira;
- e) Balanço mensal da relação biomassa de madeira e lodos para queima na caldeira;
- f) Balanço mensal da produção de vapor na caldeira de biomassa;
- g) Balanço econômico da não disposição do lodo em aterro industrial.

3.2 Caracterização dos resíduos

Para caracterização química e físico-química dos materiais foi utilizado laboratório externo contratado pela empresa, acreditado de acordo com os critérios da ABNT NBR ISO/IEC 17025 e que faz parte da Rede Brasileira de Calibração (RBC).

Foram realizadas coletas do lodo biológico após adensamento e cinzas da caldeira de biomassa, acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório credenciado.

Para a determinação da classe em que se enquadrava o lodo biológico, foram realizados os testes na massa bruta, lixiviação e solubilização dos materiais de acordo com a norma ABNT NBR 10.004:2004. Como procedimentos para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, extrato solubilizado de resíduos sólidos e amostragem de resíduos sólidos, utilizou-se respectivamente as normas ABNT NBR 10.005:2004, NBR 10.006:2004 e NBR 10.007:2004.

Os resíduos são classificados, conforme ABNT NBR 10.004:2004, como:

- Resíduos Classe I - Perigosos: São aqueles que apresentam periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto contagiosas, podendo apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Estes resíduos são classificados de acordo com características descritas nos itens 4.2.1.1 a 4.2.1.5 da norma NBR 10.004, ou que constem nos Anexos A, B, C, D e E da mesma norma. Um resíduo é classificado como Classe I (Perigoso), quando um ou mais parâmetros obtidos para o extrato Lixiviado e/ou Massa Bruta estiverem acima dos valores máximos permitidos pela NBR 10004:2004 ou seus Anexos.
- Resíduos Classe II - Não Perigosos.
- Resíduos Classe II A - Não Inertes: Esses resíduos podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Um

resíduo é classificado nesta classe quando um ou mais parâmetro obtidos para o extrato Solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos pelo Anexo G da NBR 10004:2004.

- Resíduos Classe II B - Inertes: São aqueles que submetidos ao teste de solubilização, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, dureza, turbidez e sabor, conforme anexo G da norma ABNT NBR 10.004:2004.

As análises realizadas para a caracterização dos resíduos seguiram metodologias e critérios abaixo:

- pH: USEPA (*Environmental Protection Agency*) 150.1 - pH (*Electrometric*) / USEPA 9045 D – para pH de solos e águas.
- Ponto de Fulgor: ABNT NBR 14598:2012 / Procedimento Operacional Padrão 138- Rev. 04.
- Fluoreto: *Standard Methods*, 22^a Ed. 2012 - 4500 F- C. – Método com eletrodo seletivo de íons / Cetesb L9.213 - 1995.
- Compostos Orgânicos Voláteis (VOC): USEPA (*Environmental Protection Agency*) 8260C - 2006 – por cromatografia gasosa / espectrometria de massa (GC/MS) - Rev. 03 - 2006.
- Cloreto: *Standard Methods* 4500 - Cl⁻ B – Método argentométrico.
- Metais: USEPA (*Environmental Protection Agency*) 6010C - Espectrometria de emissão Atômica por plasma indutivamente acoplada - Rev. 03 - Fev. 2007.
- Ânions: USEPA (*Environmental Protection Agency*) 300.0 - determinação de ânions inorgânicos por cromatografia de íons.
- Mercúrio: USEPA (*Environmental Protection Agency*) 7470A - Mercúrio em resíduos líquidos (Técnica Manual de Vapor a Frio) - Rev. 01 - Set 1994.
- Semi-Voláteis de Compostos Orgânicos (PAH/SVOC): USEPA (*Environmental Protection Agency*) 8270D – por cromatografia gasosa / espectrometria de massa (GC/MS) - Rev. 04 - 2007.
- Cianeto Total: USEPA (*Environmental Protection Agency*) 335.2 - *Standard Methods* 4500 - CN - E – Método colorimétrico.

Os dados para esse estudo foram compilados em planilhas eletrônicas (Excel) para apresentação de tabelas, quadros e gráficos, sendo que para tratamentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab® 17.2.1.

3.3 Caracterização química elementar e por aproximação dos materiais

Para caracterização elementar e de aproximação dos materiais foi utilizado laboratório externo contratado pela empresa, acreditado de acordo com os critérios da ABNT NBR ISO/IEC 17025 e que faz parte da Rede Brasileira de Calibração (RBC).

Foram realizadas coletas dos lodos após adensamento e cinzas da caldeira de biomassa, acondicionadas em sacos plásticos e enviadas ao laboratório credenciado.

A determinação de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre foi realizada utilizando espectrofotometria com equipamento da Perkin-Elmer através de método baseado na oxidação completa da amostra (combustão) e analisando os gases liberados pelo método de combustão e detecção por infravermelho.

As determinações de umidade seguiram métodos e normas da empresa com base na ABNT/NBR 8293. As determinações de poder calorífico seguiram métodos e normas com base na ASTM D2015-66. As determinações de densidade seguiram métodos e normas com base na ABNT/NBR. Os valores de oxigênio dos materiais foram calculados através de balanço estequiométrico, pela diferença dos resultados expressados sem considerar a porcentagem das cinzas, fechando 100% do material com base na massa seca.

As determinações de Sólidos Totais Dissolvidos Fixos e Voláteis foram feitas de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Edition, 2012. Método 2540 E.

Os dados para esse estudo foram compilados em planilhas eletrônicas (Excel) para apresentação de tabelas, quadros e gráficos, sendo que para os tratamentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab® 17.2.1.

3.4 Caracterização dos gases de exaustão da caldeira de biomassa

A caracterização das emissões atmosféricas provenientes da queima de lodo na caldeira de biomassa foi realizada através de laboratório externo contratado pela empresa, acreditado de acordo com os critérios da ABNT NBR ISO/IEC 17025 e que faz parte da Rede Brasileira de Calibração (RBC).

As metodologias utilizadas nas medições e suas interpretações seguem os critérios e condicionantes dos órgãos ambientais, segundo resolução CONAMA nº 316/2002, observando as seguintes normas:

- Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias - NBR 10701 - (CETESB L9.221).
- Determinação da massa molecular base seca - NBR 10702 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - (CETESB L9.223).
- Determinação da velocidade e vazão - NBR 11966 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - (CETESB L9.222).
- Determinação da umidade - NBR 11967 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - (CETESB L9.224).
- Determinação de material particulado - NBR 12019 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - (CETESB L9.225).
- Determinação de dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e névoas de ácido sulfúrico - NBR 12021 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - (CETESB L9.228).
- Determinação de Óxidos de Nitrogênio - CETESB L9.229 - Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias: USEPA (*Environmental Protection Agency*) -7.
- Determinação de Cloro Livre e Ácido clorídrico - CETESB L9.231.
- Determinação de Dibenzo-p-dioxinas Policloradas e Dibenzofuranos Policlorados em Combustores Residuais Municipais, USEPA (*Environmental Protection Agency*) - 23.
- Determinação de metais em fontes estacionárias, USEPA (*Environmental Protection Agency*) - 29.
- Determinação de emissões de mercúrio particulado e gasoso de incineradoras de lodos, USEPA (*Environmental Protection Agency*) - 101 A.
- Determinação da qualidade do ar quanto as emissões de cianeto particulado e gasoso de fontes estacionárias, USEPA (*Environmental Protection Agency*) - 202.1.
- Determinação das emissões totais de flúor a partir do método de eletrodo de íons específicos de fontes estacionárias, USEPA (*Environmental Protection Agency*) - 13B.

O Coletor Isocinético para Poluentes Atmosféricos, ou trem de amostragem, utilizado durante as coletas é constituído de um painel de controle, compartimento de caixa quente e fria, extensão flexível e sonda de inox equipada com aquecimento, tubo de *Pitot* e sensor de temperatura. Partes do equipamento, tais como: gasômetro, placa de orifício e tubo de *Pitot*, são periodicamente calibrados pela CETESB - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo, segundo norma E16.030 (Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes gasosos). O coletor foi acoplado no ponto de controle da chaminé dos gases de exaustão da caldeira de biomassa, localizada após o precipitador eletrostático da caldeira. Os resultados obtidos referenciam-se às condições operacionais da caldeira no momento amostral, queimando a mistura de lodos e biomassa de madeira de eucalipto.

Os dados para esse estudo foram compilados em planilhas eletrônicas (Excel) para apresentação de tabelas, quadros e gráficos, sendo que para os tratamentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab[®] 17.2.1.

3.5 Monitoramento dos gases de exaustão da caldeira de biomassa

Materiais particulados, Óxidos de enxofre, Óxidos de nitrogênio, Gás Carbono, Dióxido de Carbono, são monitorados através das emissões atmosféricas por meio de instrumentos analíticos instalados na chaminé de saída de gases da caldeira, após o precipitador eletrostático, caracterizados como instrumentos “*on line*”. Esses sistemas de controle estão disponíveis para o corpo operacional em tempo real e são sistemicamente verificados e calibrados de acordo com padrões específicos para cada parâmetro medido, as informações e armazenamento de dados são integradas através do *software* PI (*Process Information*) da OSIsoft (*PI ProcessBook* 2015 R2 SP1, versão 3.6.1.184).

As análises de material particulado foram realizadas utilizando-se equipamento da Sick, modelo DUSTHUNTER SB100, que é um medidor testado em termos de adequabilidade para detectar teores pequenos e médios de poeira em aplicações mais exigentes, em gases quentes ou agressivos. A medição baseia-se na difusão de retorno da luz (segundo a medição gravimétrica de comparação). O aparelho integra uma verificação automática do ponto zero e de referência, bem como, um controle de sujeira. Utiliza a faixa espectral de 640 nm e faixa de medição de 0 a 200 mg/m³. Os resultados são integrados na rede Intranet que alimenta os sistemas de controle operacionais e estão disponibilizados no modo “*on line*” através do *software* *PI ProcessBook*.

As análises de Óxidos de enxofre, Óxidos de nitrogênio, Gás Carbono, Dióxido de Carbono foram realizadas utilizando-se analisadores de gás da ABB – modelo AO2000-MultiFID14, que são específicos para medições contínuas dos gases (*on line*). Compreende o módulo de fotômetro de processo com o princípio de medição por absorção não dispersiva do infravermelho (NDIR), que trabalha na faixa espectral de 2,5 a 8 μm e monitora as concentrações mais baixas destes componentes (exemplo: Gás Carbono até 10 ppm). Outro módulo de fotômetro por correlação de filtros de gás ou comparação do comprimento de onda, opera na faixa espectral do ultravioleta e visível de 200 a 600 nm e, também, na faixa espectral do infravermelho de 2,5 a 10 μm , monitorando, também, as concentrações mais altas destes componentes (exemplo: Gás Carbono até 500 ppm). Outros módulos incorporados utilizam as condutividades térmicas distintas dos diferentes gases. As concentrações de cada componente de medição são determinadas quantitativamente na sua condutividade em relação a uma mistura binária ou quase binária. Outro módulo para análises de Oxigênio (O_2) utiliza-se do conceito de monitoramento com base no comportamento paramagnético específico para este gás, com faixas de medição que variam de 0 a 100 Vol.-% O_2 .

As metodologias utilizadas nas medições e suas interpretações seguem os critérios e condicionantes dos órgãos ambientais, segundo resolução CONAMA nº 316/2002, assim como os parâmetros monitorados podem seguir as normas descritas no item “3.2”, o qual aborda as caracterizações dos gases da chaminé, após o precipitador eletrostático da caldeira de biomassa.

Os dados para esse estudo foram compilados em planilhas eletrônicas (Excel) para apresentação de tabelas, quadros e gráficos, sendo que para os tratamentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab[®] 17.2.1.

4 RESULTADOS

4.1 Balanço mensal de lodos gerados nas estações de tratamentos de efluentes (ETE's)

Os dados levantados para o balanço mensal de lodos gerados nas estações de tratamentos de efluentes, em toneladas, correspondem ao período de janeiro de 2017 até julho de 2018 para a Fábrica 1 e de janeiro de 2018 até julho de 2018 para a Fábrica 2. Para os dados da Fábrica 2 não foram consideradas as informações de agosto até dezembro de 2017, por considerar este período como início operacional desta planta e a curva de aprendizagem operacional.

A composição destes materiais corresponde aos lodos de origem biológica da Fábrica 1 somado ao lodo misto da Fábrica 2, composto pelo lodo da estação de tratamento de água e os lodos primários e secundário da estação de tratamento de efluentes.

A Tabela 1 apresenta os dados do balanço de geração de lodos considerando o período em estudo, observando que os volumes mensais em toneladas equivalem aos materiais de acordo com as características de saída de cada processo. O lodo biológico da Fábrica 1 é desaguado através de centrífugas, saindo deste processo com teor de sólidos secos aproximadamente igual a 12%, e o lodo misto da Fábrica 2 é desaguado através de prensas, saindo deste processo com teor de sólidos secos aproximadamente igual a 20%.

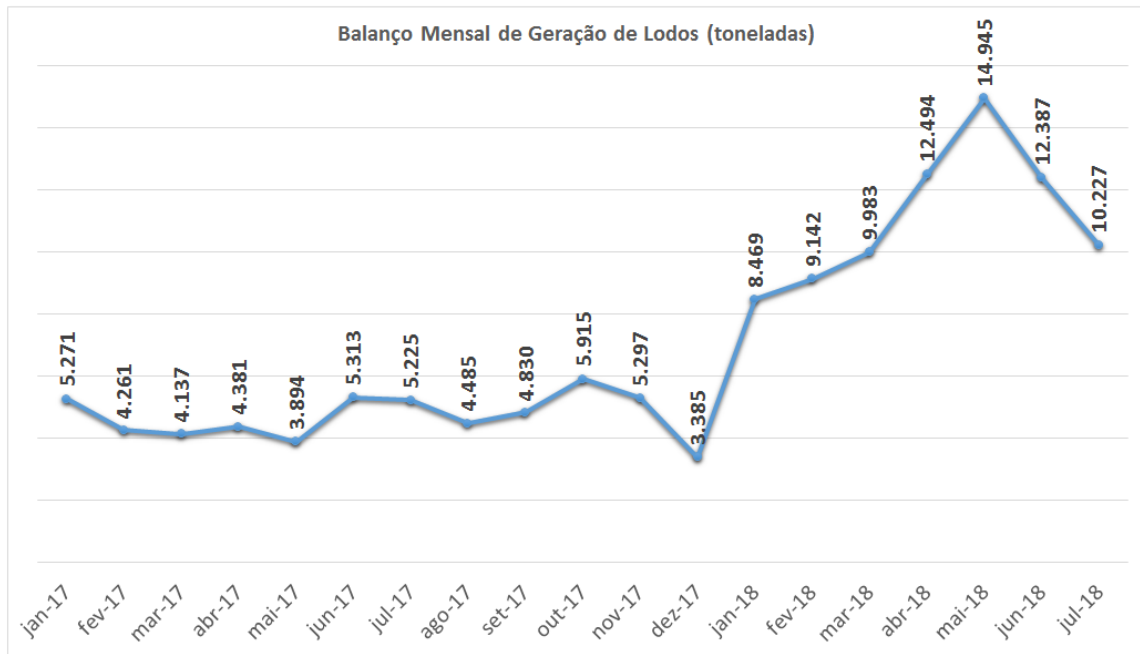
Tabela 1 - Balanço mensal de lodos gerados durante o período considerado para estudo.

Período	Lodo gerado fábrica 1 (t)	Lodo gerado fábrica 2 (t)	Lodo gerado fábricas 1 e 2 (t)	Produção de celulose fábrica 1 (t)	Produção de celulose fábrica 2 (t)	Produção Total de celulose fábricas 1 e 2 (t)
jan-17	5.271		5.271	108.492		108.492
fev-17	4.261		4.261	95.603		95.603
mar-17	4.137		4.137	106.230		106.230
abr-17	4.381		4.381	103.962		103.962
mai-17	3.894		3.894	111.331		111.331
jun-17	5.313		5.313	102.839		102.839
jul-17	5.225		5.225	106.910		106.910
ago-17	4.485		4.485	111.548		111.548
set-17	4.830		4.830	105.939		105.939
out-17	5.915		5.915	100.788		100.788
nov-17	5.297		5.297	103.014		103.014
dez-17	3.385		3.385	105.876		105.876
jan-18	3.804	4.665	8.469	98.052	159.512	257.564
fev-18	4.472	4.670	9.142	102.951	149.669	252.620
mar-18	3.774	6.210	9.983	69.682	139.855	209.537
abr-18	5.106	7.389	12.494	101.055	101.952	203.007
mai-18	6.054	8.891	14.945	103.507	139.991	243.498
jun-18	6.137	6.250	12.387	103.906	155.919	259.825
jul-18	6.469	3.757	10.227	108.750	172.072	280.823

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

A Figura 19 apresenta a somatória, em toneladas, da quantidade de lodos gerados no período considerado para estudo.

Figura 19 - Balanço mensal da geração total de lodos.



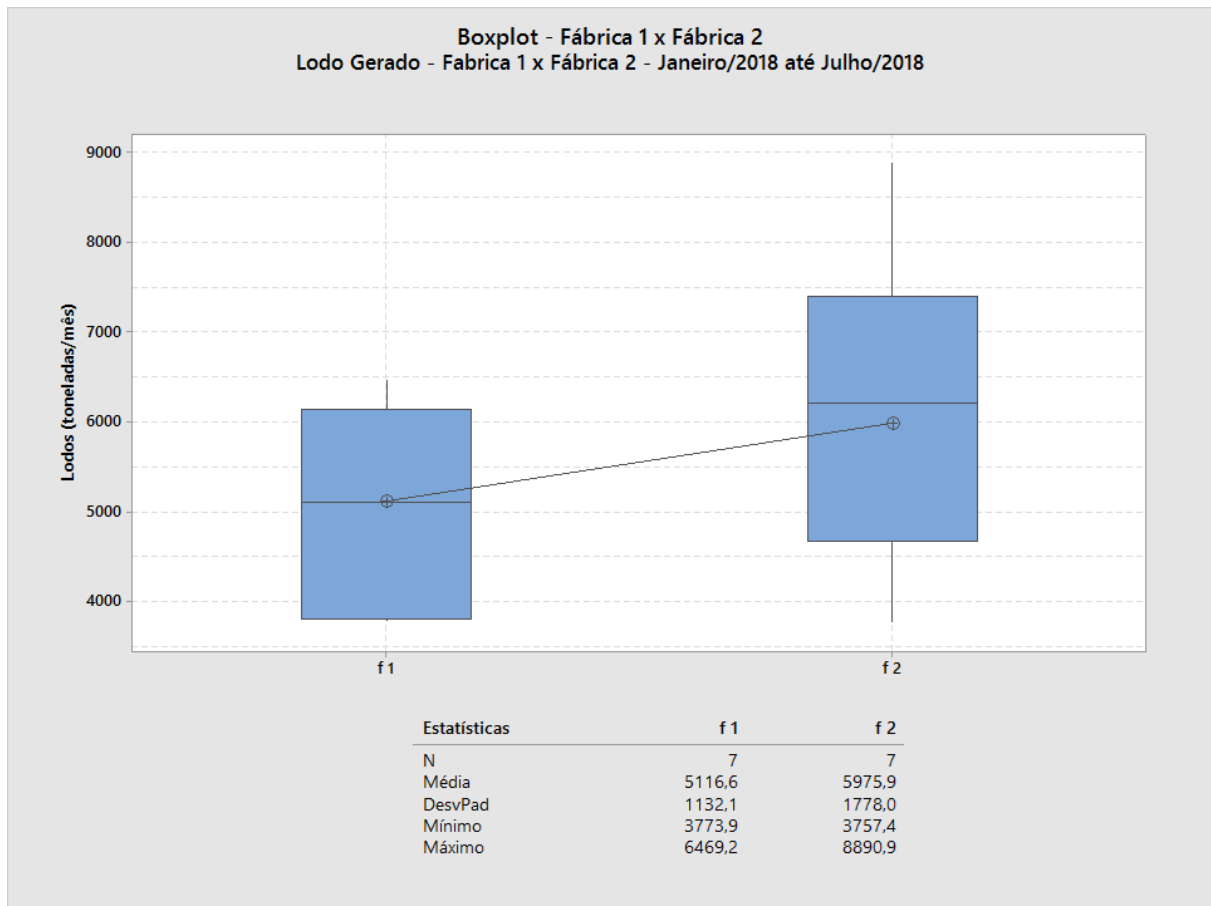
Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Para efeito comparativo da geração de lodos entre as Fábricas 1 e 2, consideramos o período de janeiro/2018 a julho/2018, porque foi neste período que ocorreu o início da estabilidade operacional da segunda fábrica.

A distribuição das quantidades de lodos gerados, mostra para a Fábrica 1 valor médio igual a 5.117 toneladas por mês, observando que dentro do intervalo de confiança (IC) de 95%, esta variação pode situar entre 4.070 até 6.164 toneladas mensal e, para a Fábrica 2, o valor médio é igual a 5.976 toneladas por mês, observando, também, que dentro do intervalo de confiança (IC) de 95%, esta variação pode situar entre 4.332 até 7.620 toneladas por mês.

A diferença entre os valores médios encontrados é igual a 859 toneladas de lodos gerados por mês e o intervalo de confiança (IC) de 95% apresenta que esta diferença pode se situar entre 916 até 2.635 toneladas de lodos gerados por mês. A Figura 20 apresenta a distribuição estatística dos valores considerando o período de comparação, utilizando o *software* estatístico Minitab® 17.2.1.

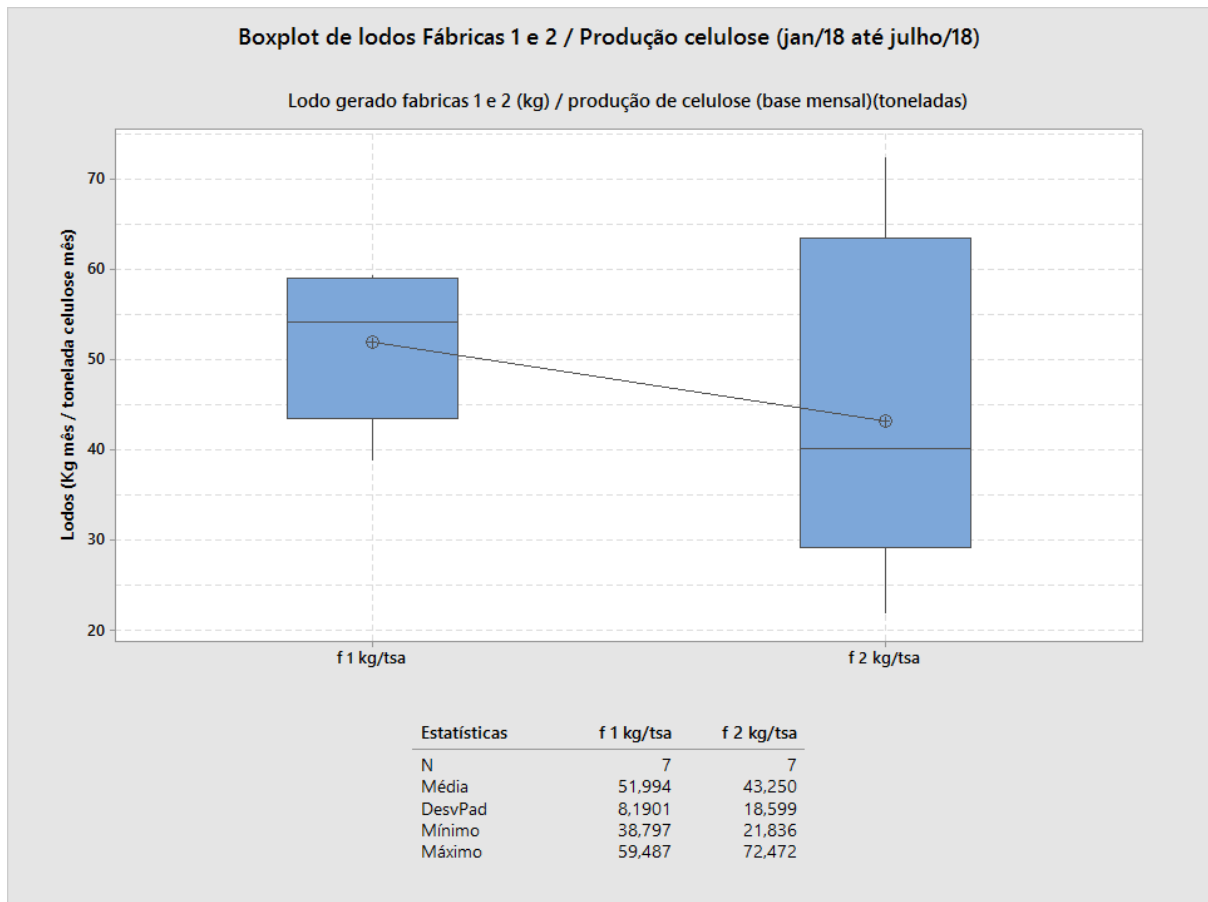
Figura 20 - Comparação estatística da geração de lodos.



Fonte: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

A comparação entre lodos gerados das Fábricas 1 e 2 considerando a produção de celulose mensal de cada período estudado, está demonstrada na Figura 21 que sintetiza a distribuição estatística dos valores considerando a quantidade de lodo gerado em toneladas por toneladas de celulose produzida.

Figura 21 - Comparação estatística da geração de lodos por produção de celulose.



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

O valor médio de geração de lodos em toneladas / tonelada de celulose produzida na Fábrica 2 inferior ao valor da Fábrica 1 pode não apresentar a realidade conceitual da planta, principalmente porque o perfil de produção média de celulose da Fábrica 2 apresentou nesse estudo um valor médio igual a 146.000 toneladas e o valor estimado de projeto seria igual a 169.000 toneladas (13,6% abaixo da capacidade nominal), observando que em julho de 2018 a Fábrica 2 estava no seu 11º mês de produção. Já a Fábrica 1 apresentou melhor estabilidade de produção no período (o desvio padrão demonstrou esse critério) e ficou 9,3% abaixo da sua capacidade nominal.

4.2 Balanço mensal de lodos enviados para queima na caldeira de biomassa

O balanço mensal de lodos, em toneladas, destinados para queima na caldeira de biomassa está demonstrado na Tabela 2.

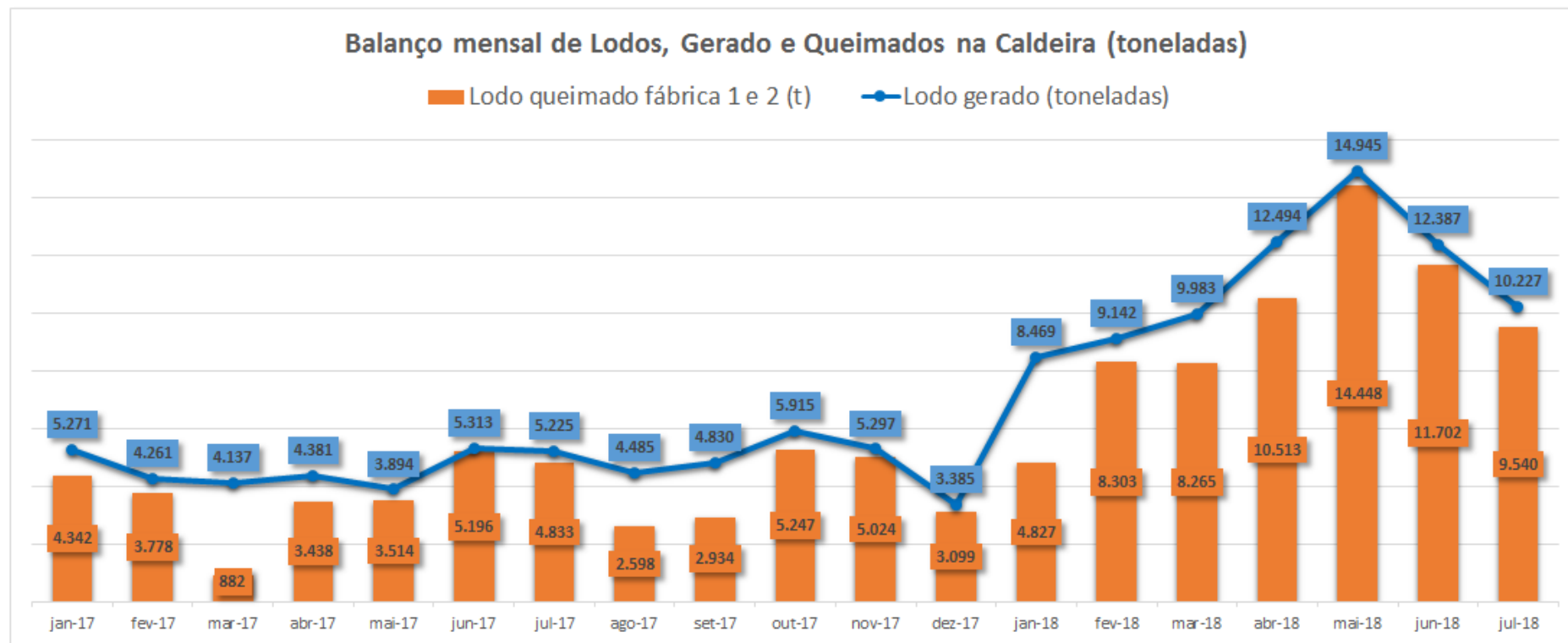
Tabela 2 - Balanço mensal de lodos queimados na caldeira de biomassa.

Período	Lodo queimado fábrica 1 (t)	Lodo queimado fábrica 2 (t)	Lodo queimado fábrica 1 e 2 (t)
jan-17	4.342		4.342
fev-17	3.778		3.778
mar-17	882		882
abr-17	3.438		3.438
mai-17	3.514		3.514
jun-17	5.196		5.196
jul-17	4.833		4.833
ago-17	2.598		2.598
set-17	2.934		2.934
out-17	5.247		5.247
nov-17	5.024		5.024
dez-17	3.099		3.099
jan-18	1.983	2.844	4.827
fev-18	4.364	3.939	8.303
mar-18	3.460	4.805	8.265
abr-18	4.791	5.722	10.513
mai-18	5.977	8.471	14.448
jun-18	5.876	5.826	11.702
jul-18	6.207	3.333	9.540

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

A Figura 22 demonstra a diferença gráfica entre o balanço mensal de lodos gerados e o balanço mensal de lodos destinados para queima na caldeira de biomassa, em toneladas.

Figura 22 - Balanço mensal geração de lodos e queima na caldeira de biomassa.

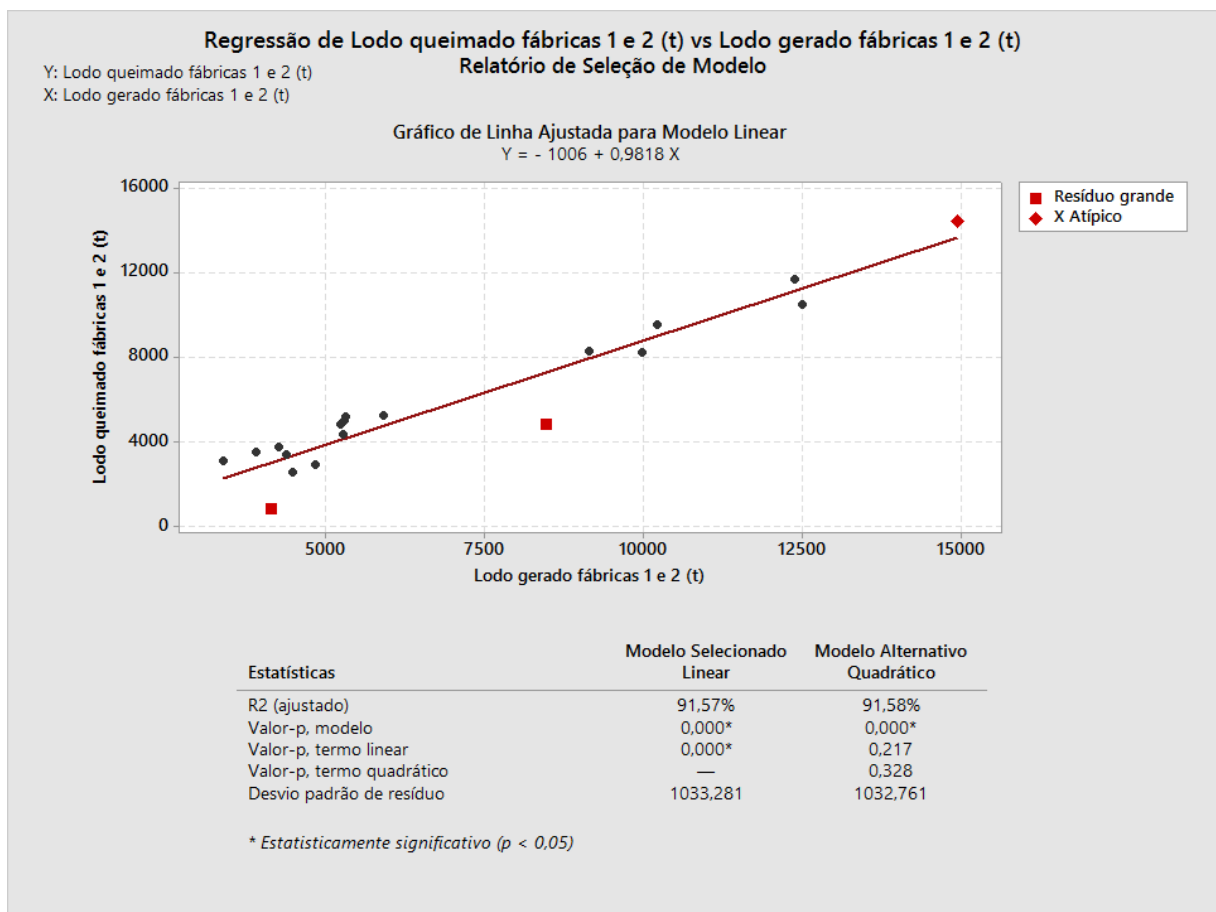


Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

Fonte: Fibria (2017).

A Figura 23 apresenta a relação entre a geração e a queima de lodo na caldeira de biomassa. Através da avaliação de regressão dos dados, utilizando o *software* Minitab® 17.2.1 como ferramenta estatística, com o aumento da geração de lodo também aconteceu o aumento da queima deste material na caldeira de biomassa, o que está consorciado com o planejamento gerencial da empresa para aproveitamento da maior quantidade possível deste resíduo como biocombustível, mitigando a disposição destes materiais em aterro industrial.

Figura 23 - Geração e queima de lodos: Relatório de seleção de modelo.



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Na Figura 23, o coeficiente de determinação apresentou valores ajustados praticamente similares para o modelo linear e quadrático, equivalentes a 91,57 e 91,58%, respectivamente. Isto indica que, quando o lodo gerado aumenta, o lodo destinado para a queima também tende a aumentar, comprovando que, para o período do estudo, mesmo com a geração maior de lodos pela entrada em operação da segunda fábrica, foi assertivo o balanço para a elevação da produção de vapor na caldeira de biomassa, possibilitando absorver este aumento de lodos na mistura dos combustíveis para a caldeira. Os resíduos grandes e atípicos da figura, são

equivalentes aos dados nos períodos de *upgrade* da caldeira de biomassa, *start up* da segunda fábrica e paradas para manutenção da caldeira.

4.3 Balanço mensal de lodos enviados para aterro industrial

O balanço mensal de lodos destinados para o aterro industrial, em toneladas, está demonstrado na Tabela 3. A diferença entre os valores gerados e queimados de lodos demonstram os volumes em toneladas encaminhados para o aterro industrial.

Tabela 3 - Balanço mensal de lodos enviados para aterro industrial.

Período	Lodo enviado para aterro		Lodo enviado para aterro fábricas 1 e 2 (t)
	fábrica 1 (t)	fábrica 2 (t)	
jan-17	929		929
fev-17	483		483
mar-17	3.255		3.255
abr-17	943		943
mai-17	381		381
jun-17	117		117
jul-17	391		391
ago-17	1.887		1.887
set-17	1.896		1.896
out-17	668		668
nov-17	273		273
dez-17	286		286
jan-18	1.821	1.821	3.642
fev-18	109	731	839
mar-18	314	1.404	1.719
abr-18	315	1.667	1.981
mai-18	77	420	497
jun-18	261	424	685
jul-18	262	425	687

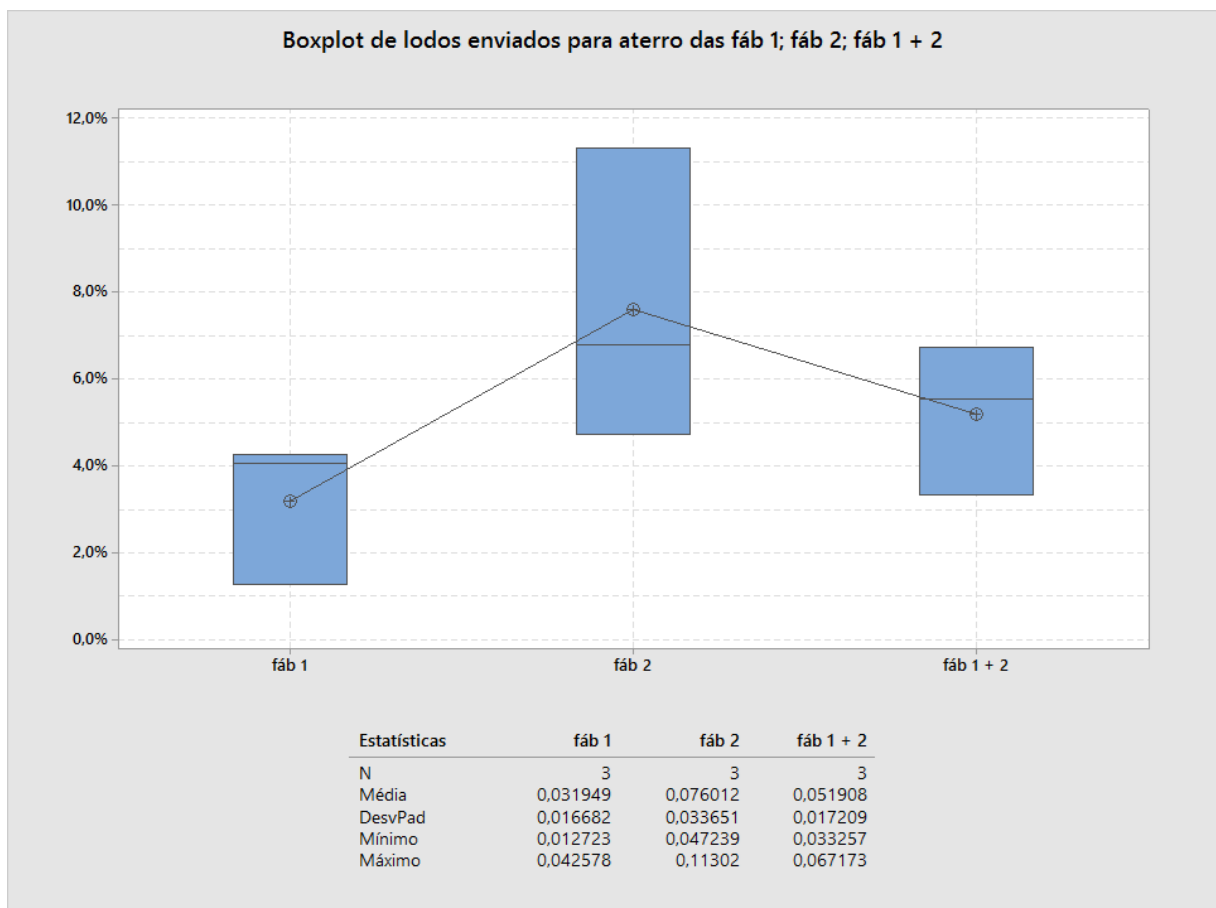
Fonte: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

No mês de março/2017 aconteceu *upgrade* da caldeira de biomassa, alterando a sua capacidade produtiva de 120 para 150 toneladas de vapor por hora. No período foi enviado lodo para aterro equivalente a 78,7% do volume total gerado. Durante os meses de agosto e setembro/2017 aconteceu o *start up* da Fábrica 2 e, a partir deste período, teve início a adequação dos processos para a composição da mistura de lodos e queima na caldeira de biomassa, isto justifica o incremento de lodos para aterro industrial na Fábrica 1, demonstrado pela Tabela 3, representando cerca de 40,7% de lodos gerados. O terceiro período mais crítico foi janeiro/2018, em função de paradas da caldeira para manutenção, onde 43% do lodo gerado

nas duas fábricas foi enviado para aterro industrial. O último período a ser considerado é equivalente as paradas gerais para manutenção das duas plantas, a Fábrica 1 aconteceu em março/2018 e a Fábrica 2 em abril/2018, nesse período 16,5% dos lodos gerados nas duas fábricas foram destinados para aterro industrial.

Expurgando os dados equivalentes aos períodos citados acima, é possível verificar que no último trimestre do estudo, o valor médio do volume de lodos da Fábrica 1 e Fábrica 2 enviados para aterro industrial corresponde a 5,2% do volume total de lodo gerado pela planta. Para a Fábrica 2, o volume de lodos enviados para aterro corresponde a 7,6% do total de lodo gerado. A Figura 24 sintetiza a diferença entre os percentuais de lodos enviados para aterro das Fábricas 1 e 2 no último trimestre do estudo.

Figura 24 - Lodos enviados para aterro (%).



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

Fonte: Fibria (2017).

Na Figura 24 é possível observar variação maior na Fábrica 2, isto pode ser atribuído a fatores de ajustes operacionais e adequação dos processos produtivos às suas condições e oportunidades de acordo com o projeto original.

4.4 Balanço mensal da relação biomassa de madeira e lodos para queima na caldeira

O consumo de biomassa de madeira faz parte do balanço energético da empresa, as fontes deste material são: a) cascas retiradas de aproximadamente 30% da madeira que entra na indústria, exclusivamente para abastecer o processo produtivo da Fábrica 1; b) cavacos de madeira, de tamanhos acima dos limites de especificação para a produção de celulose, que são repicados, denominados tecnicamente de *oversize*, somados aos cavacos de madeira denominados de finos e palitos, de dimensões abaixo dos limites de especificação para a produção de celulose, neste item somam-se as Fábricas 1 e 2. Estes materiais são encaminhados através de esteiras transportadoras para o silo de biomassa, protegidos das intempéries para não sofrer impacto do perfil de umidade que afeta o seu poder calorífico.

O balanço mensal da queima da quantidade de lodos com biomassa, expressos em toneladas, está demonstrado na Tabela 4, assim como os valores percentuais relativos a cada material.

Tabela 4 - Balanço mensal da relação de queima de lodos e biomassa na caldeira.

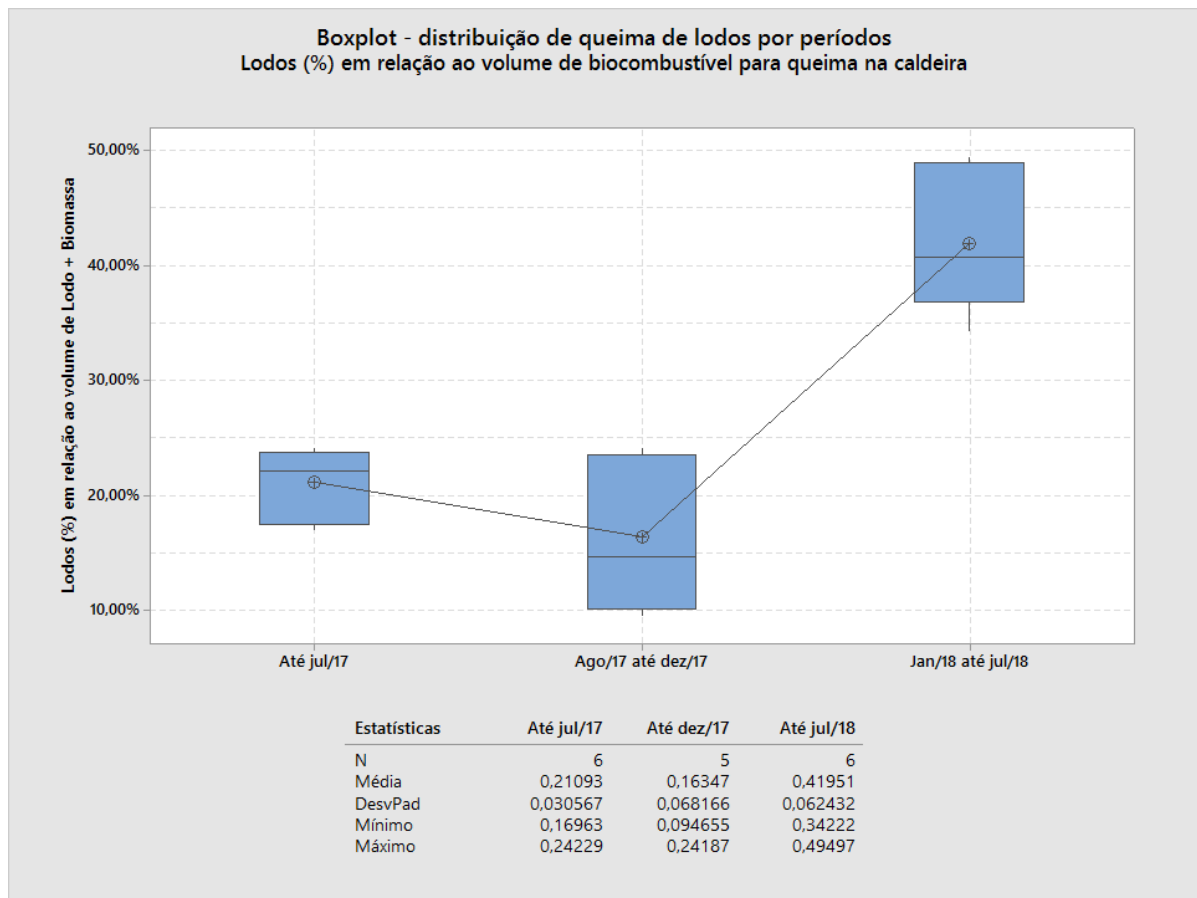
Períodos	Lodo queimado Fabricas 1 e 2 (t)	Biomassa de madeira (t)	Biocombustível Total (t)	Lodo queimado Fabricas 1 e 2 (%)	Biomassa de madeira (%)
jan-17	4.342	15.467	19.809	21,92%	78,08%
fev-17	3.778	12.281	16.059	23,53%	76,47%
mar-17	882	16.878	17.760	4,97%	95,03%
abr-17	3.438	16.038	19.476	17,65%	82,35%
mai-17	3.514	17.201	20.715	16,96%	83,04%
jun-17	5.196	16.249	21.444	24,23%	75,77%
jul-17	4.833	16.872	21.705	22,27%	77,73%
ago-17	2.598	24.853	27.452	9,47%	90,53%
set-17	2.934	24.656	27.591	10,64%	89,36%
out-17	5.247	16.447	21.694	24,19%	75,81%
nov-17	5.024	17.017	22.041	22,79%	77,21%
dez-17	3.099	18.047	21.146	14,65%	85,35%
jan-18	4.827	15.162	19.989	24,15%	75,85%
fev-18	8.303	13.690	21.993	37,75%	62,25%
mar-18	8.265	13.240	21.505	38,43%	61,57%
abr-18	10.513	13.942	24.455	42,99%	57,01%
mai-18	14.448	14.741	29.189	49,50%	50,50%
jun-18	11.702	12.270	23.972	48,82%	51,18%
jul-18	9.540	18.336	27.876	34,22%	65,78%

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

Fonte: Fibria (2017).

É possível destacar três momentos distintos, a saber: o primeiro, até julho/2017, quando somente o volume de lodos da Fábrica 1 misturava com o volume de biomassa; o segundo, a partir de agosto/2017, onde acontece a transição para adequação da queima de lodos das duas fábricas; e, o terceiro, a partir de janeiro/2018, através do incremento produtivo da Fábrica 2. A Figura 25 demonstra esses períodos em destaque.

Figura 25 - Lodos (%) em relação ao total de biocombustível para queima na caldeira.



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Observação importante é que durante os meses de agosto e setembro/2017 o consumo maior de biomassa correspondeu ao período de *start up* da Fábrica 2 e a necessidade de adequação dos balanços da mistura de lodos e biomassa de madeira.

Para o primeiro período a relação entre lodo e biomassa apresenta valores médios iguais a 21 e 79%, respectivamente. Para o segundo período, considerado momento de transição, esta relação passa para valores médios iguais a 16 e 84%, respectivamente. Para o último período os valores de lodo representam 42% e a biomassa de madeira 58%.

Para este balanço foram excluídos dois momentos específicos, a saber: março/2017, no qual foi feito o *upgrade* da caldeira, e janeiro/2018, no qual houve parada das caldeiras para manutenções. Com este critério foi possível observar que o percentual de lodo dobrou em relação à biomassa de madeira do primeiro para o terceiro período.

4.5 Balanço mensal da produção de vapor na caldeira de biomassa

Os dados do balanço mensal da produção de vapor foram tratados estatisticamente excluindo os momentos de paradas da caldeira, mas, não excluindo os períodos de reduções da produção de vapor. A Tabela 5 apresenta o perfil mês a mês com os valores médios horários de produção de vapor da caldeira.

Tabela 5 - Balanço mensal da produção de vapor pela caldeira de biomassa.

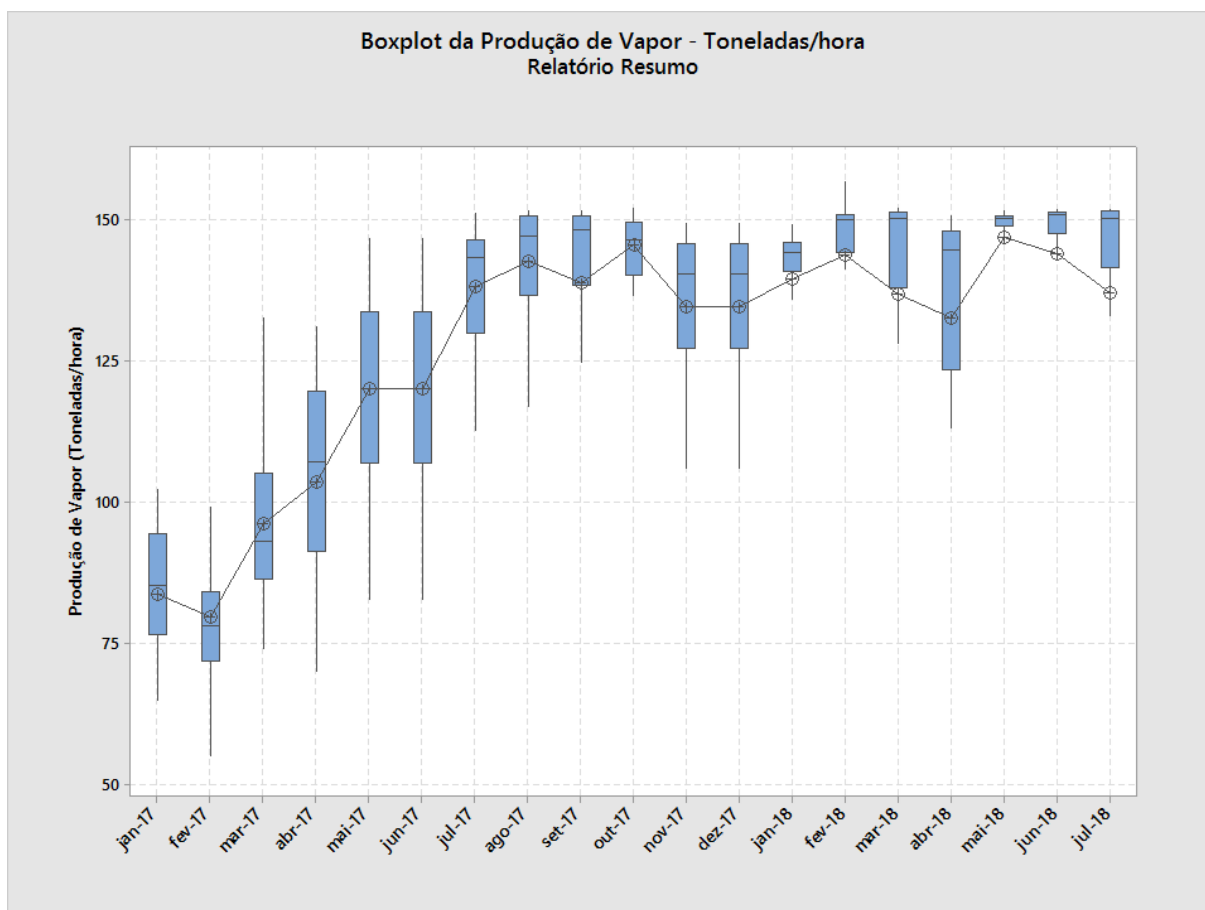
Balanço da Produção de Vapor na Caldeira de Biomassa (toneladas/hora)																		
jan-17	fev-17	mar-17	abr-17	mai-17	jun-17	jul-17	ago-17	set-17	out-17	nov-17	dez-17	jan-18	fev-18	mar-18	abr-18	mai-18	jun-18	jul-18
102	99	84	116	112	112	126	151	138	149	142	142	141	150	149	135	151	151	152
84	82	86	110	103	103	139	142	139	151	97	97	146	151	149	113	151	149	150
73	99	92	91	112	112	134	149	149	141	111	111	147	151	152	82	151	144	150
86	55	74	91	128	128	121	150	146	139	129	129	120	151	151	118	147	91	151
82	109	55	91	115	115	114	152	125	140	149	149	144	151	149	124	145	52	150
94	88	93	106	107	107	127	119	139	139	121	121	146	141	137	135	149	148	152
78	65	90	106	134	134	113	151	149	149	143	143	148	151	151	123	149	151	142
99	73	88	105	120	120	116	148	139	147	148	148	146	104	38	145	150	151	152
92	69	110	93	97	97	131	150	105	146	146	146	142	127	128	146	149	151	133
94	78	133	106	87	87	130	145	140	150	106	106	143	150	141	143	150	151	137
96	87	100	108	83	83	145	148	149	140	138	138	142	150	152	151	150	152	44
92	81	88	126	90	90	144	151	151	152	143	143	143	150	151	146	150	151	51
85	78	104	111	116	116	145	127	125	150	135	135	141	150	152	148	151	147	149
91	77	86	78	125	125	147	121	152	146	148	148	143	151	152	148	151	152	66
95	71	104	71	140	140	148	151	138	150	146	146	90	157	151	148	150	152	93
90	70	111	114	137	137	137	147	102	152	140	140	137	151	151	148	151	152	141
76	73	105	122	115	115	141	147	151	146	150	150	136	150	152	148	138	150	151
77	72	117	75	125	125	129	137	140	151	139	139	146	150	151	148	151	151	146
95	75	105	47	101	101	144	147	152	140	145	145	111	149	152	55	150	140	152
96	84		70	104	104	146	151	151	136	142	142	143	151	150	54	150	148	152
95	105		121	143	143	142	151	151	152	138	138	146	147	53	144	149	152	152
80	78		119	147	147	146	152	149	149	132	132	147	151	139	137	151	145	152
78	81		117	116	116	143	145	148	137	136	136	149	91	151	120	66	141	152
71	81		123	131	131	149	151	151	146	107	107	149	144	149	131	150	151	151
68	78		131	143	143	150	148	149	140	146	146	146	144	116	145	151	152	148
65	74		123	144	144	148	135	151	144	147	147	146	124	92	150	150	151	146
41	69		107	119	119	142	144	46	150	141	141	144	145		151	152	151	152
69			120	135	135	144	121	141	140	146	146	124			150	152	151	151
83				133	133	145	117	152	145	120	120	145			148	151	151	142
				132	132	145	137	149	148	107	107				145	148		149
				129	129	151	136		149							150		

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

Fonte: Fibria (2017).

É importante destacar que no mês de março/2017 aconteceu a parada e reforma da caldeira para incremento da produção de vapor. A Figura 26 traduz a Tabela 5 através do modelo de *boxplot*, utilizando o *software* estatístico Minitab® 17.2.1, podendo ser verificado o incremento produtivo da produção de vapor da caldeira de biomassa.

Figura 26 - Síntese mensal da produção de vapor da caldeira de biomassa (tonelada/hora).

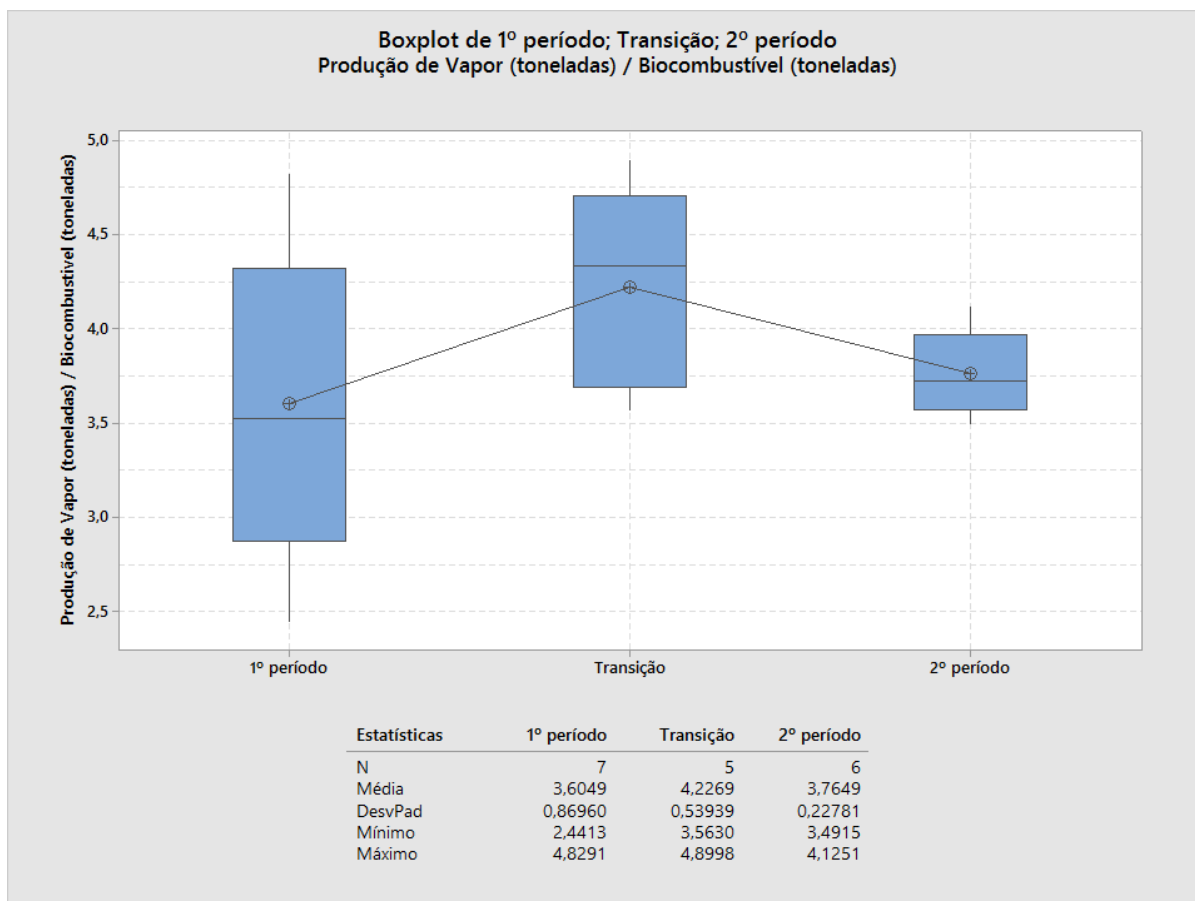


Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Através da distribuição da produção de vapor por meio de *boxplot*, condensando os valores mensalmente, é possível verificar que após a reforma da caldeira em março/2017 com a alteração da capacidade produtiva de vapor, a caldeira atinge a partir de julho/2017 o seu novo patamar produtivo. Instabilidades produtivas são observadas em função da entrada em operação da segunda fábrica e com o período que corresponde às paradas para manutenção da caldeira e das paradas gerais para manutenção das fábricas nos meses de março e abril de 2018. Observa-se ainda maior estabilidade operacional da caldeira, no seu novo patamar produtivo, no último trimestre deste estudo.

A Figura 27 apresenta a relação entre a produção de vapor e o consumo de biocombustível (mistura de lodos e biomassa de madeira).

Figura 27 - Comparação da produção de vapor / biocombustível (tonelada/tonelada).



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

É possível verificar, através da relação produção de vapor e consumo de biocombustível com a mistura de 21% de lodos e 79% de biomassa de madeira, uma maior variação durante o período anterior ao *upgrade* da caldeira com desvio padrão igual a 0,87.

No período de transição, considerando a fase de *start up* da Fábrica 2, o incremento de produção de vapor provavelmente aconteceu devido ao maior percentual de utilização de biomassa de madeira na mistura do biocombustível (84%), em função da necessidade de adequação dos lodos gerados na nova planta de celulose.

No terceiro período, após os seis primeiros meses de operação da Fábrica 2 e o início da estabilização operacional desta planta, o percentual de lodo na mistura do biocombustível apresentou valor médio de 42% (dobro do valor apresentado no primeiro período), a produção de vapor gerada foi ligeiramente maior do que aquela gerada no primeiro período do estudo,

com desvio padrão menor e igual a 0,23, sendo que, muito provavelmente, a inclusão de lodos adensados da Fábrica 2 colaborou com maior estabilidade da na mistura do biocombustível.

4.6 Balanço econômico da não disposição de lodos em aterro industrial

Para a composição deste balanço foram consideradas as seguintes premissas básicas:

- a) Densidade aparente das misturas de lodos das Fábricas 1 e 2: valor médio igual a 0,61 t/m³;
- b) Custo médio da movimentação volumétrica do lodo (do local de disposição dos lodos até o aterro industrial e operação do aterro): valor médio igual a R\$ 56,80/m³.

A Tabela 6 sintetiza as informações conforme os seguintes critérios:

- a) O balanço volumétrico em metro cúbico (m³) de lodos gerados = lodos gerados (toneladas) / Densidade aparente (toneladas/m³);
- b) O balanço volumétrico em metro cúbico (m³) de lodos enviados para queima na caldeira de biomassa = lodos queimados na caldeira (toneladas) / Densidade aparente (toneladas/m³);
- c) O balanço volumétrico em metro cúbico (m³) de lodos destinados para as células do aterro industrial = lodos destinados para aterro (toneladas) / Densidade aparente (toneladas/m³);
- d) O balanço de custos com movimentação de lodos para aterro = lodos destinados para aterro (m³) x Custo médio de movimentação de materiais para o aterro (R\$/m³);
- e) O balanço dos valores economizados pela queima de lodos na caldeira com a visão mensal = lodos destinados para queima na caldeira de biomassa mensalmente (m³) x Custo médio de movimentação de materiais para o aterro (R\$/m³);
- f) O balanço dos valores economizados anualmente pela queima de lodos na caldeira = Valores economizados pela queima de lodos na caldeira de biomassa mensal x Número de meses no ano de operação da caldeira (12);

Com este modelo podem ser sintetizados os valores relacionados aos custos deixados de praticar com as movimentações de lodos para disposição no aterro.

Tabela 6 - Balanço econômico com a operação de lodos para queima em caldeira.

Datas	Lodo Gerado (m ³)	Lodo para a Caldeira (m ³)	Lodo para aterro (m ³)	Custo de Movimentação para o aterro (R\$)	Economia pela Queima de Lodos na Caldeira (R\$)	Economia anualizada pela Queima de Lodos na Caldeira (R\$)
jan-17	8.641	7.118	1.522	86.473	404.318	4.851.818
fev-17	6.985	6.193	792	44.966	351.788	4.221.459
mar-17	6.782	1.446	5.336	303.105	82.138	985.655
abr-17	7.182	5.636	1.546	87.816	320.119	3.841.428
mai-17	6.384	5.760	624	35.436	327.182	3.926.189
jun-17	8.710	8.518	192	10.903	483.800	5.805.603
jul-17	8.565	7.923	642	36.441	450.038	5.400.456
ago-17	7.353	4.260	3.093	175.674	241.954	2.903.446
set-17	7.918	4.810	3.108	176.524	273.233	3.278.792
out-17	9.696	8.602	1.094	62.159	488.575	5.862.900
nov-17	8.684	8.236	448	25.455	467.800	5.613.597
dez-17	5.550	5.080	469	26.662	288.558	3.462.693
jan-18	13.884	7.913	5.970	339.120	449.479	5.393.754
fev-18	14.988	13.611	1.376	78.160	773.132	9.277.585
mar-18	16.366	13.549	2.818	160.034	769.571	9.234.848
abr-18	20.482	17.234	3.248	184.488	978.909	11.746.911
mai-18	24.499	23.685	815	46.280	1.345.284	16.143.410
jun-18	20.307	19.184	1.123	63.779	1.089.654	13.075.843
jul-18	16.765	15.639	1.126	63.965	888.281	10.659.374

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

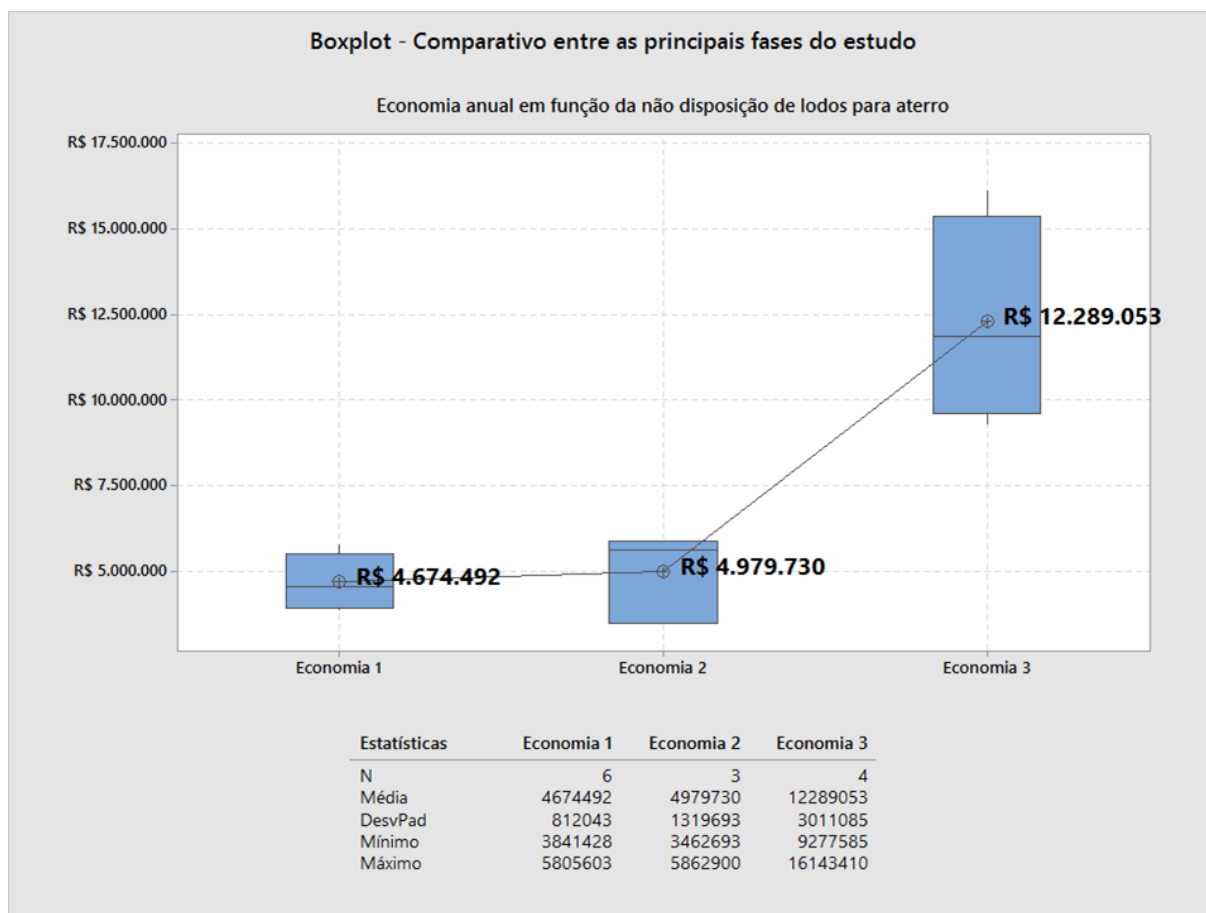
Fonte: Fibria (2017).

Os valores grifados em negrito na Tabela 6 representam eventos comentados no item “4.3”, considerados aqui como valores anômalos e, para efeito conclusivo, não farão parte da sequência analítica desenvolvida no trabalho.

Foram separados em três períodos distintos os resultados da Tabela 6, escrevendo como Economia 1, 2 e 3. O primeiro período corresponde a distribuição de informações relativas à destinação de lodos gerados exclusivamente pela Fábrica 1. O segundo período corresponde a soma da Fábrica 1 com a Fábrica 2, exclusivamente durante as fases de *start up* e curva de aprendizagem produtiva da segunda fábrica. O terceiro período corresponde ao período de estabilização operacional das fábricas, quanto à geração de lodos e seus destinos, e que pode ser conceituado como o período de melhor prospecção de resultados para análises mais significativas de valores.

A Figura 28 apresenta os resultados destes três períodos, tratados estatisticamente através do *software* Minitab® 17.2.1 e apresentado graficamente por meio de *boxplot*.

Figura 28 - Comparação da economia entre as fases do estudo.



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

A fase “Economia 1” representa o valor médio dos períodos equivalentes com a quantidade de lodos queimados na caldeira de biomassa e oriundos da Fábrica 1. Observando que nesta fase a relação lodo / biomassa de madeira representava 21% / 79%, respectivamente, e a produção de vapor da caldeira estava limitada a 120 toneladas/hora; portanto, esta é a economia da empresa, no período de 12 meses, somente com a movimentação de lodos para aterro.

A fase “Economia 2” representa o valor médio dos períodos equivalentes de transição, que compreende após o *upgrade* de produção da caldeira, passando para o novo limite de produção de vapor igual a 150 toneladas/hora e representa a quantidade de lodos enviados para a queima na caldeira de biomassa das Fábricas 1 e 2. A relação entre lodo para a caldeira e biomassa de madeira representava 18% / 82%, respectivamente, e a produção de vapor oscilava entre 130 a 150 toneladas/hora; portanto, esta é a economia da empresa, no período de 12 meses, somente com a movimentação de lodos para aterro.

A fase “Economia 3” representa o valor médio dos períodos equivalentes a melhor estabilização da planta dentro do estudo, considerando que a curva de aprendizagem operacional da Fábrica 2 já havia sido concluída. A relação entre lodo para a caldeira e biomassa de madeira representou 42% e 58%, respectivamente, e a produção média diária de vapor no último trimestre do estudo apresentou valores muito próximos a 150 toneladas/hora; portanto, esta é a economia da empresa, no período de 12 meses, somente com a movimentação de lodos para aterro

Observa-se que nas fases “Economia 1 e 2” a diferença entre os valores anualizados equivalentes a não deposição de lodos em aterros, não é significativo, porque no período de transição os processos ainda estavam em fase de estabilização, assim como os controles de geração de lodos também, além da necessidade de manter a elevação gradativa da produção de vapor da caldeira para atingir a nova produção nominal.

Comparando-se os valores das fases de “Economia 1 e 2” e da fase “Economia 3”, o valor anualizado através da não deposição de lodos em aterros é significativo, pois aumentou de R\$ 4.827.111,00 (valor médio das Fases 1 e 2) para R\$ 12.289.053,00. Isto se deve, também, ao incremento da queima de lodos na caldeira que, após a estabilização das plantas operacionais, subiu de 7.082 para 18.030 m³ de lodos enviados para queima na caldeira, volume este deixado de ser depositado em aterro industrial.

Em uma indústria de celulose não são enviados somente lodos não processados como biocombustível para o aterro industrial, mas, também, se somam a estes outros rejeitos, como *dregs*, *grits*, cinzas e outros materiais orgânicos.

Após a estabilização das operações das Fábricas 1 e 2, foi possível estimar que estes outros resíduos perfazem aproximadamente um montante médio de aproximadamente 14 kg por tonelada de celulose produzida.

Considerando uma produção média mensal das plantas igual a 280.000 toneladas de celulose e a densidade média destes resíduos igual a 1,7 t/m³, tem-se um volume mensal destes resíduos igual a 2.306 m³. Anualizando tem-se 27.671 m³ de resíduos sendo enviados para aterros, somando-se ao volume de lodos não utilizados como biocombustível.

Avaliando a vida útil de uma célula de aterro, alteada, com volume útil igual a 600.000 m³, é possível se verificar as diferenças entre aproveitar lodos como biocombustível e não se ter a opção desta utilização. A Tabela 7 sintetiza a diferença entre gerar lodos e enviar para aterros ou utilizar como biocombustível em caldeira de biomassa.

Tabela 7 - Avaliação da vida útil de um aterro x o volume de lodo enviado para este aterro.

Lodo enviado para aterro (m³/ano)	Lodos + resíduos para aterro (m³/ano)	Volume aterro (m³)	Vida útil do aterro (anos)
229.676	257.347	600.000	2,3
13.320	40.990	600.000	14,6

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

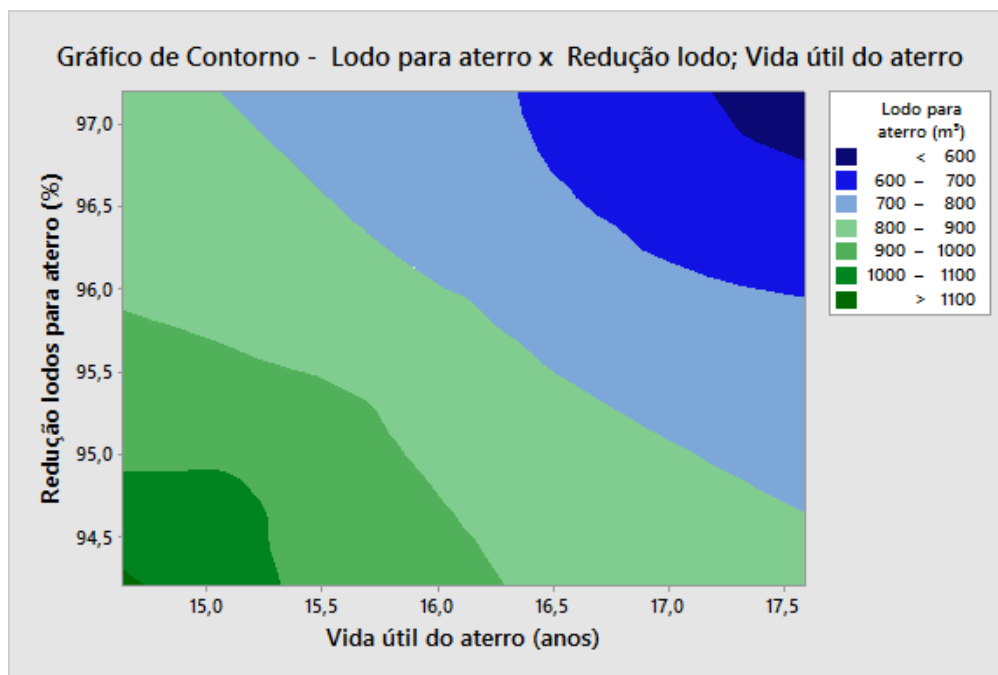
A diferença de vida útil do aterro apresentada na Tabela 7 é bastante significativa, pois, se todo o lodo tivesse que ser enviado para aterro, a cada 2,3 anos seriam necessárias novas células, ocupando espaços, aumentando o passivo ambiental eterno da empresa, além do incremento de custos com construções, controles, tratamentos de lixívias e chorumes, e, também, de licenças e comprometimentos ambientais de longo prazo.

O tempo de vida útil elevado para 14,6 anos oportuniza à empresa adequar suas operações sem estar gerando passivos ambientais de grandes volumes e estudar seus processos para cada vez mais economizar com a redução de envio de lodos e resíduos para o aterro industrial.

No contexto para avaliar oportunidades, foi verificado que no último trimestre deste estudo, a relação entre lodos enviados para a queima em caldeira como biocombustível e lodos gerados é aproximadamente igual a 94,2%. Foi realizada simulação com o *software* estatístico Minitab® 17.2.1 com incrementos de 0,5% no valor encontrado desta relação e os resultados

dos ganhos na vida útil do aterro industrial são apresentados, através do modelo de gráfico de contorno, na Figura 29.

Figura 29 - Avaliação do aumento queima da biomassa na vida útil do aterro.



Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Através da Figura 29 é possível observar oportunidades de elevação da vida útil da célula do aterro em função do aumento do volume de lodo enviado para queima na caldeira e/ou se reduzir a geração destes materiais nas suas fontes primárias, contribuindo para maior produtividade das plantas operacionais com conseqüente menor geração de resíduos.

Através dos resultados obtidos é possível verificar o impacto da disposição de lodos em aterros industriais no custo de produção de celulose. Considerando valores históricos de projetos da empresa tem-se que: o valor para a construção de uma célula de aterro industrial, com dimensão de 250.000 m³ equivale a aproximadamente R\$ 28.700.000,00 considerando a necessidade de aterramento do terreno, construção do sistema de recalque para a ETE, maior largura do talude para necessidade de alteamento. Se for necessário efetuar o processo de alteamento desta mesma célula para 600.000 m³, o valor do investimento para este volume adicional será de aproximadamente igual a R\$ 15.000.000,00, que, somado ao investimento inicial, totaliza o valor aproximado de R\$ 43.700.000,00 em investimento.

Considerando então que:

- A produção de celulose anual prevista é de 3.100.000 toneladas.

- O investimento necessário para a construção / alteamento de uma célula para aterro de 250.000 m³ para 600.000 m³ é de R\$ 43.700.000,00.
- O valor economizado anualmente com a operação de movimentação de lodos para o aterro é de R\$ 12.289.053,00.

No final do 1º ano resulta um valor equivalente a R\$ 10,10 / tonelada de celulose produzida $([R\$ 43.700.000,00 - R\$ 12.289.000,00] / 3.100.000)$.

Diante deste contexto, a Tabela 8 mostra a amortização do investimento com aterro industrial ao longo do tempo.

Tabela 8 - Amortização do investimento com aterro industrial ao longo do tempo.

Amortização do investimento com Aterro (meses)	Valor residual (R\$)	Valor específico (R\$/tonelada de celulose)
12 meses	R\$ 31.410.946,87	10,1
24 meses	R\$ 19.121.893,73	6,2
36 meses	R\$ 6.832.840,60	2,2
43 meses	-R\$ 335.773,73	-0,1

Fonte: Elaboração Própria.

Analisando a Tabela 8 é possível verificar que, ao final de pouco mais 3,5 anos (42 meses), o valor investido para a construção de uma célula de aterro industrial com o volume alteado para 600.000 m³ e o critério adotado de envio de lodos para a queima na caldeira, associado ao ritmo produtivo anual previsto, estará equacionado.

4.7 Caracterização química e físico-química de lodos e biomassa para aproveitamento dos resíduos como biocombustíveis

De acordo com a norma ABNT NBR 10.004:2004, para a caracterização de resíduos é necessário realizar ensaios na Massa Bruta no extrato lixiviado e no extrato solubilizado dos materiais em estudo.

Em conformidade aos critérios desta norma, os resíduos em estudo gerados na Fibria (atual Suzano) em Três Lagoas são classificados como Classe IIA e podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

A alternativa de aproveitamento de qualquer tipo de resíduo, quando viável economicamente e ambientalmente, é seguramente a solução mais racional a ser tomada.

Basicamente, um resíduo pode ser aproveitado como fonte energética, ou como matéria-prima. Neste último caso, o resíduo pode ser criteriosamente introduzido no mesmo processo produtivo que o gerou, como ocorre na reciclagem, ou inserido em outro processo produtivo. A grande preocupação está relacionada à possibilidade de lixiviação ou arraste, diluição ou dessorção em meio líquido de elementos poluentes, tais como metais pesados ou substâncias tóxicas, para o meio ambiente, podendo acarretar perda de nutrientes dos solos contaminação do lençol freático por ação da chuva e da irrigação.

A Tabela 9 apresenta a avaliação analítica dos lodos, de acordo com ABNT NBR 10.004:2004, seguindo a metodologia apresentada, condições amostrais e ensaios pertinentes para cada parâmetro analisado.

Tabela 9 - Resultados analíticos de lodos.

Amostra	Parâmetros	Resultado	Unidade	ABNT NBR 10.004:2004
Massa Bruta	pH	8,0	-	(≤ 2 ou $\geq 12,5$)
	Ponto de fulgor	> 100	°C	(> 60°C)
Amostra	Parâmetros	Resultado	Unidade	Anexo F da Norma ABNT NBR 10.004:2004
Lixiviado	Fluoreto	0,79	mg/L	150
	Clorofórmio	0,007	mg/L	6
Amostra	Parâmetros	Resultado	Unidade	Anexo G da Norma ABNT NBR 10.004:2004
Solubilizado	Cloreto	103	mg/L	250
	Fluoreto	0,55	mg/L	1,5
	Sódio	12	mg/L	200
	Nitrato como N	0,12	mg/L	10

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS)
Fonte: Fibria (2017).

Analisando a Tabela 9, verifica-se que os valores analíticos encontrados no material tratado como massa bruta, lixiviado e solubilizado das amostras de lodos, satisfazem os limites permitidos de acordo com os padrões especificados nas normas de referências citadas na tabela.

Em amostras pontuais de lodos, biomassa de madeira de eucalipto e a mistura destes materiais, simulando o biocombustível a ser queimado em caldeira, também em laboratório contratado pela empresa, foram caracterizadas quanto às concentrações elementares, de aproximação e poder calorífico. A Tabela 10 demonstra os resultados analíticos dos lodos, biomassa de madeira e misturas, seguindo a metodologia apresentada, condições amostrais e ensaios pertinentes para cada parâmetro analisado.

Tabela 10 - Resultados analíticos dos lodos, biomassa de madeira e misturas.

	Unidade	Biomassa de Eucalipto	Lodo Primário	Lodo Biológico	Lodos + Biomassa
Carbono	% massa seca	47,4	39,8	41,4	45,9
Hidrogênio	% massa seca	5,5	5,8	6,1	5,5
Enxofre	% massa seca	< 0,01	< 0,18	< 0,96	< 0,09
Nitrogênio	% massa seca	< 0,18	< 0,20	< 7,0	< 0,68
Cloretos	% massa seca	< 0,1	-	-	< 0,1
Cinzas	% massa seca	4,8	< 19,0	< 20,3	< 7,7
Oxigênio*	% massa seca	46,8	54,0	44,6	47,7
Umidade	% massa seca	30 a 40	62 a 74	74 a 88	< 48,8
Densidade	Kg/m ³	200	610	610	260
Poder Calorífico Superior	MJ/Kg	18,6	13,0	17,9	18,0
Poder Calorífico Inferior	MJ/Kg	11,4 / 9,5	3,0 / 1,3	2,5 / -0,2	7,5

* balanço sem considerar percentual de cinzas em função do material ter sido previamente seco.

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).

Fonte: Fibria (2017).

É possível observar na Tabela 10 que os teores de Carbono e Hidrogênio dos materiais são próximos, o que viabiliza a mistura como potencial de queima. Nota-se valor mais alto de Nitrogênio no lodo biológico muito provavelmente em função da aplicação de nutrientes a base deste elemento para o processo de ativação microbológica do tratamento de efluentes secundário. Os percentuais mais altos de enxofre e de cinzas nos lodos primários e secundários possivelmente são oriundos de residuais carreados dos efluentes setoriais em função da característica do processo *Kraft* para obtenção de celulose. A variação de umidade afeta o poder calorífico inferior dos materiais, mas o poder calorífico superior com os materiais secos e, também, da mistura apresenta-se compatível com a performance de queima do combustível observando a tecnologia empregada de caldeira de leito fluidizado.

Foram caracterizadas as cinzas oriundas da queima de lodos, verificando os critérios da norma ABNT NBR 10.004:2004, a Tabela 11 apresenta os principais resultados analíticos das cinzas, seguindo a metodologia apresentada, condições amostrais e ensaios pertinentes para cada parâmetro analisado.

Tabela 11 - Resultados analíticos das cinzas.

Amostras	Parâmetros	Resultado	Unidade	ABNT NBR 10.004:2004
Massa Bruta	pH	9,7	-	(≤ 2 ou $\geq 12,5$)
	Cianeto total	< 0,522	mg/Kg	250
	Sulfeto	< 0,522	mg/Kg	500
Amostras	Parâmetros	Resultado	Unidade	Anexo F da Norma ABNT NBR 10.004:2004
Lixiviado	Fluoreto	0,12	mg/L	150
	Clorofórmio	0,005	mg/L	6
	Piridina	< 0,15	mg/L	5
	Mercúrio	< 0,0010	mg/L	0,1
	Chumbo	< 0,010	mg/L	1
	Cromo	< 0,010	mg/L	5
	Selênio	< 0,005	mg/L	1
Amostras	Parâmetros	Resultado	Unidade	Anexo G da Norma ABNT NBR 10.004:2004
Solubilizado	Bário	0,24	mg/L	0,7
	Cromo total	0,04	mg/L	0,05
	Sódio	105	mg/L	200
	Cianeto total	< 0,010	mg/L	0,07
	Fluoreto	< 0,10	mg/L	1,5
	Mercúrio	< 0,0010	mg/L	0,001
	Chumbo	< 0,010	mg/L	0,01
	Ferro	< 0,050	mg/L	0,3
	Nitrato como N	0,12	mg/L	10

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Analisando a Tabela 11, verifica-se que os valores analíticos encontrados no material tratado como massa bruta, lixiviado e solubilizado das amostras de cinzas, satisfazem os limites permitidos de acordo com os padrões especificados nas normas de referências citadas na tabela.

4.8 Avaliações analíticas das emissões atmosféricas

Avaliações pontuais, através de laboratório credenciado, contratado pela empresa, foram realizadas considerando períodos de queima da mistura de lodos e biomassa de madeira. As medições foram realizadas nas emissões atmosféricas da chaminé da caldeira, seguindo os critérios da resolução do CONAMA 316/2002 e a metodologia descrita anteriormente.

A Tabela 12 apresenta os resultados médios obtidos das emissões atmosféricas e a comparação com os critérios explicitados no Artigo 38 da Resolução CONAMA 316/2002, que estabelece os Limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos para sistema de tratamento térmico de resíduos.

Tabela 12 - Resultados analíticos das emissões atmosféricas.

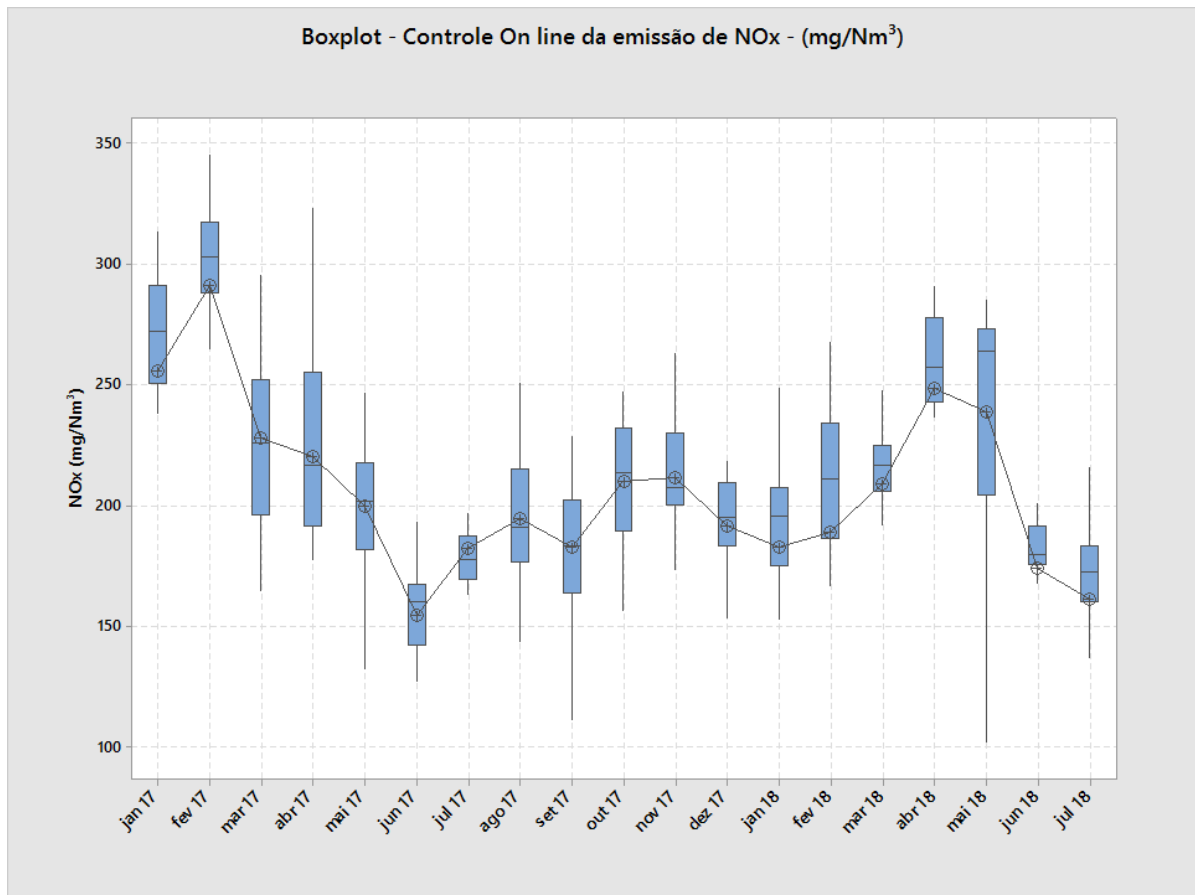
Parametro	Unidades	Valores médios	Limites Legais
Material Particulado*	mg/m ³	32,23	70
Óxidos de enxofre*	mg/m ³	14,03	280
Óxidos de nitrogênio*	mg/m ³	236,1	560
Ácido fluorídrico*	mg/m ³	0,080	5,0
Compostos clorados	Kg/h	< 1,0436	1,8
Metais classe I (Cd, Hg e Ti)**	mg/m ³	0,013	0,28
Metais classe II (As, Co, Ni, Te e Se)***	mg/m ³	0,011604	1,4
Metais classe III (Pb, Cr, Cn, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh e V)**	mg/m ³	0,287	7,0
Dioxinas e Furanos	ng/Nm	0,036	0,5

* Porcentagem de oxigênio de referência conforme a Resolução CONAMA nº 316/2002 (corrigido a 7% de oxigênio).
** Cádmio, Mercúrio e Titânio
*** Arsênio, Cobalto, Níquel, Telúrio e Selenio
**** Chumbo, Cromo, Copernício, Estanho, Fluor, Manganês, Platina, Paládio, Ródio e Vanádio.

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Comparando os resultados obtidos nas coletas dos efluentes gasosos, é possível verificar na Tabela 12 que os parâmetros monitorados atendem plenamente a legislação comparativa para o teste de queima com utilização de Lodos e Biomassa como combustível na chaminé da Caldeira de Força.

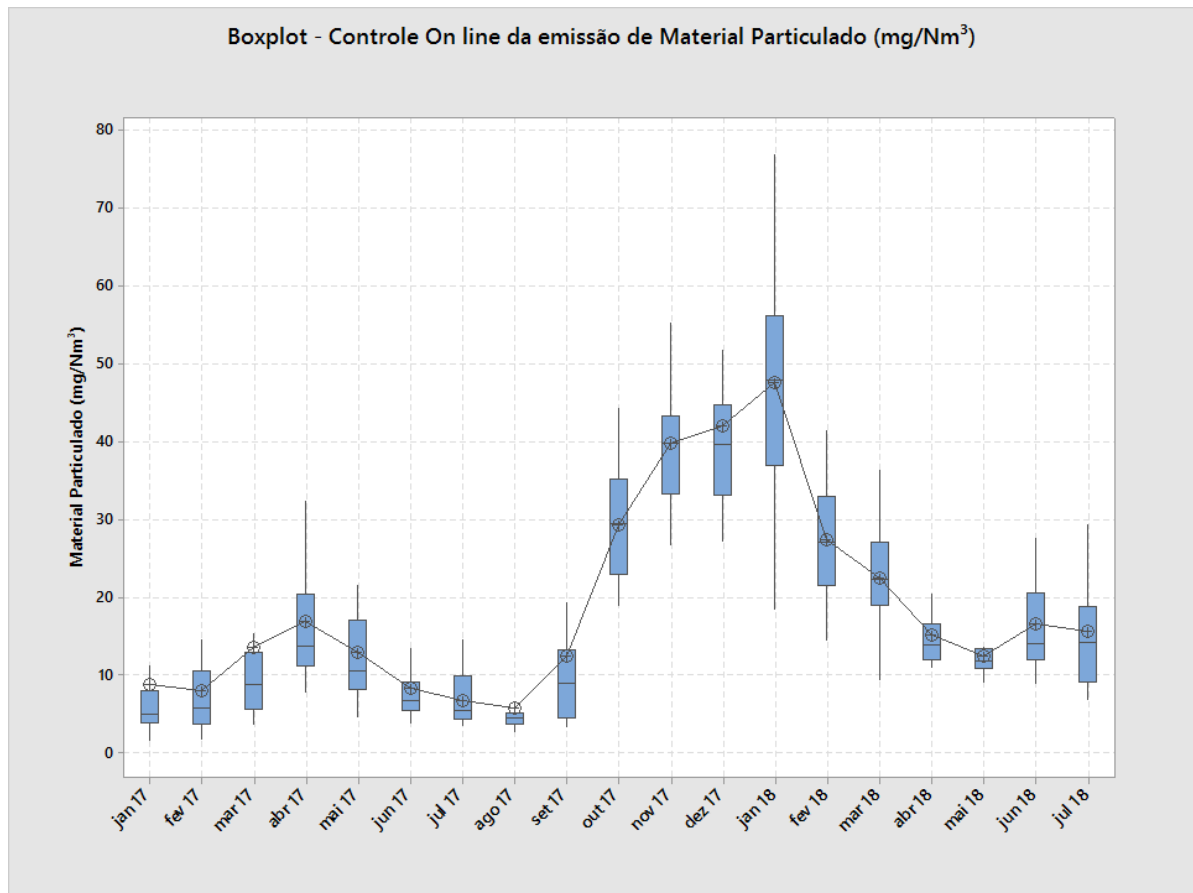
A Figura 30 apresenta os resultados obtidos de óxidos de nitrogênio ao longo do período de estudo, tratados com o *software* estatístico Minitab®, distribuídos através de médias diárias e demonstrado as variações mensais e as inflexões ao longo de cada período mensal.

Figura 30 - Controle da emissão de NOx *on line*.

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

É possível observar na Figura 30 que, mesmo após a entrada da Fábrica 2 em operação e o maior percentual de lodos incrementado na mistura do biocombustível para a caldeira, não se teve evidências de agravamento da emissão de NOx que comprometesse os parâmetros legais de controle. O valor máximo de medição deste parâmetro ocorreu em fevereiro/2017 e foi igual a 361 mg/Nm³, tratado como *outlier*, mas é inferior ao limite estipulado para este parâmetro observado na Tabela 12, segundo critérios do Conama N° 316/2002.

A Figura 31 apresenta o perfil medido das emissões de materiais particulados ao longo do período deste estudo.

Figura 31 - Controle da emissão de Materiais Particulados *on line*.

Nota: Elaborado a partir de dados da Fibria (atual Suzano) de Três Lagoas (MS).
Fonte: Fibria (2017).

Os dados da Figura 31 foram tratados com o *software* estatístico Minitab e demonstra através de *boxplot* os dados relativos de todo o período do estudo. Os valores foram sintetizados através das médias diárias e demonstrado no *boxplot* com as variações mensais e suas inflexões ao longo de cada momento.

É possível observar que após a entrada da Fábrica 2 em operação e com o maior percentual de lodos incrementado na mistura do biocombustível para a caldeira, nota-se evidências de aumento da emissão de materiais particulados em dois períodos distintos, sendo o primeiro o período de transição para a nova composição de lodos e biomassa e o segundo período o de estabilização dos processos e o novo patamar de controle deste parâmetro, com valores médios inferiores aos parâmetros legais de controle.

O valor médio do período de transição, para efeito de controle, foi igual a 75 mg/Nm³, apresentado entre agosto/2017 e fevereiro/2018, inferior ao limite estipulado na Tabela 12, segundo critérios do Conama N° 316/2002.

5 CONCLUSÕES

A geração de lodos da Fábrica 1 no período estudado (janeiro/2017 a julho/2018) corresponde a um valor médio igual a 47,45 kg/t de celulose produzida; a geração de lodos na Fábrica 2 corresponde a 43,25 kg/t de celulose produzida, observando que o período avaliado da Fábrica 2 foi do mês de janeiro até julho de 2018, após o período de *start up* e da curva de aprendizagem operacional.

O envio de lodos para aterro industrial durante todo o período estudado, sem desconsiderar os períodos de paradas da caldeira para *upgrade*, manutenções corretivas e parada geral, foi equivalente a um valor médio aproximado de 18,7% em relação ao total de lodos gerados nas duas fábricas, o que significa que 81,3% de todo o lodo gerado nas fábricas foi enviado para queima na caldeira de biomassa, evitando impacto financeiro com construções de aterros e passivo ambiental.

Considerando o último trimestre do período estudado, no qual o aproveitamento de lodos para queima na caldeira atingiu patamares de aproximadamente 94,2%, é possível demonstrar que o processo de queima de lodos na caldeira de biomassa possui viabilidade para atender as premissas estabelecidas como meta de médio prazo pela empresa, que prever a redução efetiva de envio de resíduos para aterro para cerca de 91% até o ano de 2025, considerando não somente lodos gerados nas estações de tratamentos de efluentes, mas, também, os demais resíduos gerados em outras áreas operacionais.

É possível ainda verificar que com o aproveitamento do lodo, misturado com biomassa de madeira, na proporção de 42% de lodos e 58% de biomassa, não afetou o rendimento produtivo de vapor da caldeira. O valor médio diário da produção de vapor atingiu 139,6 toneladas de vapor / hora, nos últimos três meses do estudo, chegando a 93% da produção nominal do projeto de produção após o *upgrade*.

O incremento dos lodos primário e secundário, com a entrada da segunda fábrica em operação, não afetou o poder calorífico da mistura com a biomassa de madeira de Eucalipto, em função da quantidade de Carbono presentes nestes materiais, que não divergiram significativamente entre si, muito provavelmente pela maior presença de materiais celulósicos oriundos de perdas ao longo dos processos produtivos.

É significativo o aumento da vida útil do aterro industrial com o envio de lodos para queima na caldeira de biomassa, aumentando de 2,3 anos, caso todo o lodo gerado fosse enviado para aterro industrial, para 14,6 anos, considerando como base de cálculo uma célula de aterro alteada para 600.000m³ e o balanço de envio de matérias para esta célula ao longo do tempo.

Considerando o investimento necessário para a construção de uma célula para aterro industrial e os custos com movimentação de lodos para o aterro, verifica-se que o envio destes materiais para a queima em caldeira de biomassa promove um equacionamento destes investimentos que podem ser quitados em aproximadamente 3,5 anos.

A caracterização analítica das cinzas, oriunda da queima dos lodos na caldeira, não possui restrições técnicas para ser utilizada dentro dos critérios exigidos pelo CONAMA como resíduo Classe II A, podendo ser utilizado para adensar materiais enviados para aterro e/ou ser reutilizada em outros processos.

As emissões atmosféricas oriundas do processo de queima da mistura de lodos com biomassa de madeira na caldeira não apresentaram impactos ambientais quando comparados com os requisitos e critérios do CONAMA.

Foram observadas ao longo do desenvolvimento desse trabalho novas oportunidades para estudos complementares, as quais poderão incrementar ganhos expressivos, a saber:

- a) Avaliação da taxa de arrastes de areia, oriundas do leito fluidizado e/ou associada com a biomassa de madeira e com a mistura de lodos, tendo como resultado o impacto na descontinuidade operacional da caldeira para manutenções corretivas ocasionadas por abrasão;
- b) Avaliação do impacto de incrustações formadas pela presença de cloreto de potássio e a influência desse fenômeno em obstruções da caldeira com impacto em paradas para manutenções corretivas e limpezas;
- c) Avaliação da continuidade operacional da queima de lodos e os impactos nas emissões atmosféricas pela presença de compostos nitrogenados e compostos de enxofre nas misturas de lodos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10.004/2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Classificação de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT NBR 10.005/2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Lixiviação de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT NBR 10.006/2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solubilização de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT NBR 10.007/2004. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- AVELAR, N. V. **Thermal drying of biological sludge from paper mill for energy purposes**. 2017. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.
- BONI, M. R.; D'APRILE, L.; CASA, G. Environmental quality of primary paper sludge. **Journal of Hazardous Materials, B**, Amsterdam, v. 108, p. 125-128, 2004.
- BORGES, F. **Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes doméstico e industrial como combustível na geração de energia**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2008.
- CARREIRO, M. R. M., de. **Análise exergética e ambiental do processamento do licor negro gerado em fábricas de celulose e papel**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Centro Tecnológico em Celulose e Papel - Proposta de criação**. Brasília, DF, 2016. 116 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução Conama n. 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 224, Seção 1, p. 92-95, 20 nov. 2002.
- CAMPREGHER, N. **Estudo de viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2005.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional referente ao ano de 2017 efetuado pelo MME**. Brasília, DF, 2018.

FIBRIA. **Relatório 2017**. Três Lagoas, 2017. Disponível em: www.fibria.com.br/r2017. Acesso em: 01 jun. 2017.

FAROOQ, S.; MIGUEL, A. P.; DANIEL, T. A.; CHENGGONG, S.; HAO, L. Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidized bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. **Energy**, Rondebosch, v. 141, p. 2069-2080, 2017.

FELDER, C.; AZZOLINI, J. C. Estudo de viabilidade de queima de resíduos originários da indústria de laticínio. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 4, n. 1, p. 71-84, jan./jun. 2013.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto**. [S. l.]: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2010.

GUAITOLINI, M. **Estudo da queima de lodo secundário da indústria de celulose e papel em caldeira de leito fluidizado**. 2014. 52 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

HEILAND, C. **Alternativas de destino de lodo biológico em indústrias de celulose – Processo Kraft**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologia de Produção de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2017**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www.iba.org>. Acesso em: 01 jun. 2017.

IMAI, H. M. **Aproveitamento energético do lodo de ETE de indústria de papel no município de Correia Pinto, SC**. 2010. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2010.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR., T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 54, n. 1-3, p. 17-46, 1998.

KHAN, A. A.; AHO, M.; JONG, W.; VAINIKKA, P.; JANSSENS, P. J.; SPLIETHOFF, H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 21-50, 2008.

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.** 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MAKELA, M.; GELADI, P.; LARSSON; S. H.; FINELL, M. Pretreatment of recycled paper sludge with a novel high-velocity pilot cyclone: effect of process parameters on convective drying efficiency. **Applied Energy**, Kidlington, v. 131, p. 490-498, 2014.

MAGATON A.S. **Disciplina de Química da Madeira.** Viçosa, MG, 2010. Apresentação em Power Point, slide número 2. Curso de Pós-Graduação Lato Senso em Tecnologia de Celulose e Papel - Departamento de Engenharia Florestal / Laboratório de Celulose e Papel, Universidade Federal de Viçosa.

MORAIS, F. A. B. **Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel.** 2011. 209 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Araraquara, Araraquara, 2011.

MOUNTEER A. H. **Controle ambiental na indústria de celulose e papel.** Viçosa, MG, 2012. Material didático da disciplina do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa.

PASSOLONGO, R. **Avaliação termodinâmica, termoeconômica e econômica da integração de sistemas de gaseificação da biomassa em uma usina sucroalcooleira.** 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2011.

PIOTTO, Z. C. **Eco eficiência na indústria de celulose e papel:** estudo de caso. 2003. 379 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2003.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através de briquetagem.** 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

SILVA, J. **Characterization of particulate emissions from biomass power plants.** 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

SILVA, J. B. **Hidrodinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado.** 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SOUZA, M.; VIRMOND, E. **Caracterização físico-química de lodo frigorífico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2009.

SOUZA, M. *et al.* **Caracterização de biomassas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2009.

TYAGI, V. K. *et al.* Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 25, p. 708-728, 2013.

TORQUATO, L. D. M. **Estudo de viabilidade do emprego de lodo de esgoto e resíduos agrícolas para a geração de bioenergia**. 2016. 228 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2016.

VALMET. **Technical Proposal POW12-01922.7: as Sold Revision 1**. Três Lagoas: Power Boiler Upgrade, 2015 - (Line 2 Project, 2015).

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A Cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil**. 2000. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2000.