

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

NICOLAS BRUNO SANTOS PEREIRA

**ANÁLISE DO CAVACO DE BAMBU COMO ALTERNATIVA AO CAVACO
DE EUCALIPTO PARA UTILIZAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR**

UBERLÂNDIA – MG

2022

**ANÁLISE DO CAVACO DE BAMBU COMO ALTERNATIVA AO CAVACO
DE EUCALIPTO PARA UTILIZAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos

UBERLÂNDIA – MG

2022

**ANÁLISE DO CAVACO DE BAMBU COMO ALTERNATIVA AO CAVACO
DE EUCALIPTO PARA UTILIZAÇÃO EM CALDEIRAS A VAPOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos

Trabalho de conclusão de curso aprovado em: 4 de novembro de 2022

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

Prof. Dr. Amir Roberto de Toni Jr.

Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos à minha mãe, Cristiana dos S. Aguiar pela liberdade, apoio e confiança de sempre;

À minha tia, Cristina de Fátima, pelo exemplo de família e cuidado;

À minha avó, Maria de Fátima, pelo exemplo de integridade, honestidade e luta;

Ao meu avô, Valter José Pereira pelos conselhos, carinho e exposição da realidade do nosso mundo;

Amo vocês.

Ao meu supervisor Ricardo Vallin, pela disposição em prestar os conhecimentos técnicos, paciência e amizade, assim como os operadores de caldeira que me ensinaram muito;

Ao meu professor orientador, Daniel Dall'Onder dos Santos, pela orientação, apoio e receptividade.

RESUMO

Caldeiras a vapor são equipamentos extremamente importantes nos ambientes fabris por produzirem vapor, insumo fundamental na maioria dos processos industriais que envolvem trocas térmicas. Além disso, representam grande parte dos custos de produção de diversos produtos. Tendo como base o cenário atual – o qual consiste em escassas ofertas de madeira, principalmente eucalipto, crescente demanda pela indústria de papel e celulose, além de variações positivas no preço do barril de petróleo internacional encarecendo o custo de gás natural e GLP – objetiva-se analisar o cavaco de bambu como uma alternativa viável do ponto de vista termodinâmico, econômico e ambiental. É possível que a redução de custos de implantação e manutenção de florestas de bambu frente ao eucalipto seja de até 20% em um período de 11 ou 12 anos, mantendo-se a estabilidade de queima na fornalha e dentro dos níveis de emissão de particulados determinados pela norma brasileira.

Palavras chave: caldeiras a vapor, biomassa, cavaco de bambu.

ABSTRACT

Steam boilers are essential equipment in manufacturing environments because they produce steam, a fundamental input in most industrial processes where thermal exchanges are involved. In addition, they represent a large part of the production costs of various products. Based on the current scenario - scarce supplies of wood (mainly eucalyptus) considering growing demand by the pulp and paper industry, in addition to positive variations in the price of oil, the increasing cost of natural gas and LPG - the objective of this work is to analyze the bamboo chip as a viable alternative to the eucalyptus chip above thermodynamical, economic and environmental. It is possible that the cost reduction of planting and maintaining bamboo forests compared to eucalyptus is up to 20% in a period of 11 or 12 years, maintaining the stability of burning in the furnace and within the levels of particulate emissions determined by the Brazilian standard.

Keywords: steam boilers, biomass, bamboo chip.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta Interna de Energia.....	12
Figura 2: Diferentes tipos de bambu	18
Figura 3: Operação com cavaco de bambu	22
Figura 4: Picagem do bambu.....	22
Figura 5: Foto panorâmica da caldeira em que foi realizado o teste	23
Figura 6: Fluxograma da Caldeira.....	24
Figura 7: Fluxograma de água de alimentação.....	25
Figura 8: Fluxograma de combustível.....	26
Figura 9: Cavaco de bambu sendo despejado na tremonha.....	27
Figura 10: Peneira de discos no sistema de alimentação.....	27
Figura 11: Fluxograma de Ar e Gases.....	28
Figura 12: Ventilador primário (à esquerda) e ventilador secundário (à direita)	29
Figura 13: Fluxograma de Cinzas	29
Figura 14: <i>Redler</i> coletor de cinzas.....	30
Figura 15: Fluxograma de Vapor	31
Figura 16: Comparativo da vazão de vapor consumida pela fábrica, em ton/h queimando cavaco de eucalipto (gráfico à esquerda) e mistura 50% de cavaco de eucalipto e 50% bambu (à direita)	33
Figura 17: Comparativo da pressão de vapor produzida pela caldeira, em kgf/cm ² .g queimando cavaco de eucalipto (gráfico à esquerda) e mistura 50% de cavaco de eucalipto e 50% bambu (à direita)	34
Figura 18: Filtros utilizados na análise de emissão de particulados para o mix de cavaco.....	38
Figura 19: Varetas presentes no cavaco de bambu.....	39
Figura 20: Varetas retiradas pela peneira de discos	39
Figura 21: Resíduos liberados pelo cavaco de bambu no pátio, abaixo das correias transportadoras	40
Figura 22: Resultado código EES	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre análises imediata e elementar de amostras de eucalipto e bambu .	20
Tabela 2: Nível de óxido de silício presente nas cinzas do cavaco de bambu	20
Tabela 3: Resultados coletados entre 7:40 até 9:46 para queima de cavaco de eucalipto.....	32
Tabela 4: Resultados coletados entre 10:20 até 14:59 para queima de cavaco mix, 50% cavaco eucalipto e 50% cavaco de bambu	33
Tabela 5: Resultado médio de emissões de particulado para queima com cavaco mix em 3 pontos de coleta.....	37
Tabela 6: Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira.	37
Tabela 7: Custo por hectare e produtividade, em toneladas para primeiros 5 ou 6 anos.	41
Tabela 8: Custo por hectare e produtividade, em toneladas 6 anos subsequentes.....	41
Tabela 9: Custo por hectare/ ano para 12 anos do eucalipto e 11 anos do bambu	41
Tabela 10: Comparativo de custos de florestas de bambu e eucalipto para diversos hectares....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

NR – 13: Norma Regulamentadora 13

pH: Potencial Hidrogeniônico

Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

PNMBCB: Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu

INBAR: International Network for Bamboo and Rattan

PCS: Poder Calorífico Superior

PCI: Poder Calorífico Inferior

PCU: Poder Calorífico Útil

ASTM: American Society for Testing and Materials

DIN: German Institute for Standardization

ISO: International Organization for Standardization

ICP – OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

PMTA: Pressão Máxima de Trabalho Admissível

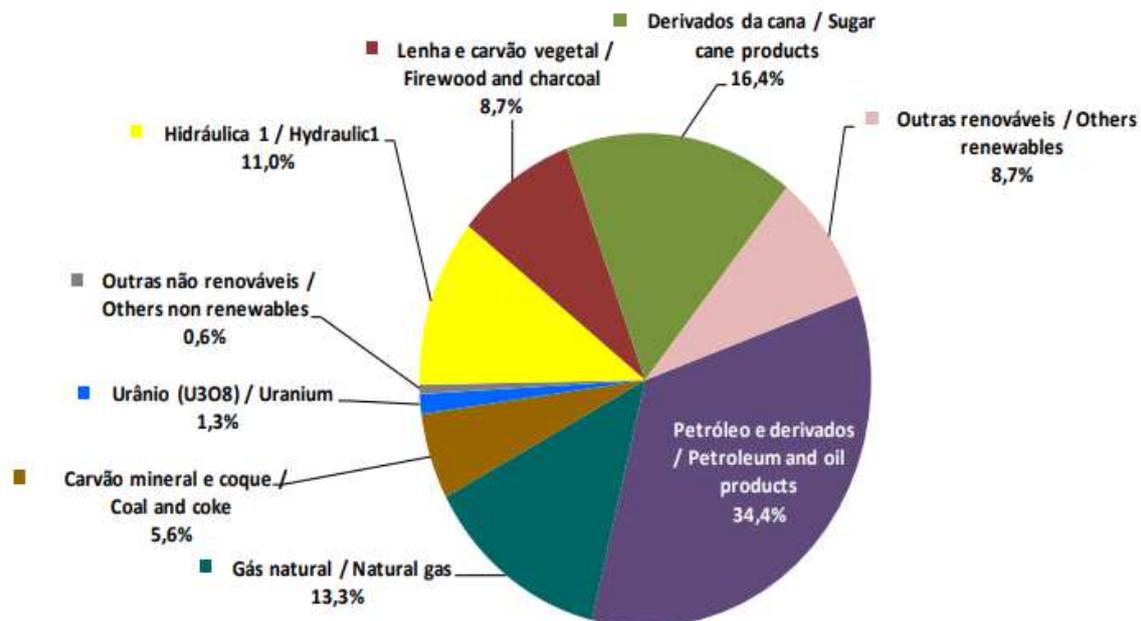
SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.2. Objetivo Geral	12
1.3. Objetivos Específicos.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Definição de caldeira, categorias e sua utilização.....	13
2.2. Componentes gerais de unidades geradoras de vapor	14
2.3. Tratamento de água para utilização em caldeiras	14
2.4. O eucalipto e sua importância econômica	15
2.5. O cavaco de bambu como biomassa	16
3. METODOLOGIA	19
3.1. Análise elementar do cavaco de bambu e poder calorífico.....	19
3.2. Comparativo – Análise química do cavaco de eucalipto e cavaco de bambu	19
3.3. Plantio, colheita e picagem do eucalipto e do bambu.....	21
3.4. Caldeira utilizada para teste com cavaco de bambu.....	23
3.4.1. Fluxograma de água de alimentação	25
3.4.2. Fluxograma de combustível.....	26
3.4.3. Fluxograma de ar e gases.....	28
3.4.4. Fluxograma de cinzas.....	29
3.4.5. Fluxograma de vapor	30
4. RESULTADOS.....	32
4.1. Balanço energético do sistema.....	34
4.2. Resultado Ambiental – Emissão de particulados	36
4.3. Outros resultados	38
4.4. Análise econômica – Plantio próprio do bambu.....	41
5. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE A.....	46
APÊNDICE B.....	48
APÊNDICE C.....	53

1. INTRODUÇÃO

O vapor, como é sabido, é a água na fase gasosa e pode ser considerado como um condutor térmico, o qual armazena energia para realizar trocas térmicas em diversas aplicações industriais. É obtido quando a energia cinética das moléculas de água no estado líquido vencem a força que a pressão exerce sobre elas. Logo, o conhecimento de suas propriedades termo físicas permite utilizá-lo em uma ampla gama de estados, além de ser um meio de energia versátil, seguro e estéril. Suas aplicações estão associadas às trocas térmicas em processos industriais, acionamento de máquinas, esterilização e limpeza, geração de energia elétrica, entre outros.

O calor específico representa a quantidade de calor que deve ser fornecida à substância, por unidade de massa, para que esta varie sua temperatura, logo, um número alto significa que esta consegue armazenar boa quantidade energia sem um aumento significativo de temperatura, o que favorece sua operação e manipulação. A preferência pelo vapor como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor específico aliado à ampla disponibilidade da água no meio industrial, seja ela de rios, lagos, represas, poços e etc. Atualmente, vapor é utilizado em larga escala tanto para serviços de aquecimento, quanto para serviços de acionamentos mecânicos (BAZZO, 1989). Sua aplicação é bastante abrangente, atendendo necessidades diversas na indústria de alimentos, bebidas, papel, têxtil, química, etc. Além disso, representa um impacto significativo no custo de produção de mercadorias e no seu preço final, logo, estudar meios que viabilizem a redução desse efeito corrobora para criar vantagens competitivas para a indústria. O gráfico a seguir, extraído do Balanço Energético Nacional de 2022 indica a porcentagem de utilização de lenha e carvão vegetal – nicho o qual o eucalipto se encaixa – e dos derivados de cana na produção de energia, o que demonstra a importância econômica e energética dessa biomassa para o país.



I. Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica. 1 kWh = 860 kcal (equivalente térmico teórico - primeiro princípio da termodinâmica). Ver Anexo II.6 - Tratamento das informações. / Includes electricity imports originated from hydraulic sources. 1 kWh = 860 kcal (physical equivalent - First Principle of Thermodynamics). Look Appendix VI.6.

. Figura 1: Oferta Interna de Energia no Brasil em 2022

1.2. Objetivo Geral

Este trabalho objetiva analisar a viabilidade de utilização do cavaco de bambu para queima em caldeiras e explicitar os resultados alcançados com os testes realizados com essa biomassa.

1.3. Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades químicas da biomassa de bambu e compará-las com o eucalipto.
- Analisar sob o ponto de vista ambiental o impacto da utilização do bambu para queima em caldeiras.
- Analisar sob o ponto de vista econômico os resultados advindos de plantios de florestas próprias de bambu

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Definição de caldeira, categorias e sua utilização

Segundo a Norma Regulamentadora 13 (NR-13), a qual discorre sobre a gestão da integridade estrutural de caldeiras e vasos de pressão, “Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares”, conforme disposto no item 13.4.1.1. Ainda, a Norma prevê classificações em duas categorias, sendo que a categoria A abrange caldeiras cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19, 98 kgf/cm², aproximadamente) e volume superior a 100 L. Já na categoria B estão englobadas caldeiras cuja pressão de operação seja superior a 60 kPa e inferior a 1960 kPa, volume interno superior a 100 L e produto entre pressão e volume superior a 6, conforme disposto no item 13.4.1.2. Com base nesta definição é possível excluir dispositivos queimadores da classificação como caldeiras, visto que não acumulam vapor. A operação industrial de caldeiras ocorre em diversos segmentos, tais como:

- Papel e celulose
- Usinas sucroalcooleiras
- Indústrias químicas e petroquímicas
- Refinarias
- Frigoríficos, abatedouros e laticínios
- Cervejarias
- Indústria têxtil e de tintas/vernizes
- Navegação marítima, fluvial e submarina
- Indústria de alimentos, farmácia, entre outros.

2.2. Componentes gerais de unidades geradoras de vapor

Os componentes gerais de unidades geradoras de vapor podem ser sintetizados em:

- **Fornalha:** local onde será queimado o combustível. É nela onde ocorre a reação de combustão e a transformação em energia térmica, aquecendo o ar no interior, tubulações e água. Após a queima, cinzas mais densas que o ar se depositam no fundo da fornalha e na grelha, predominantemente.
- **Economizador:** responsável por pré-aquecer a água de alimentação da caldeira a partir do calor residual dos gases da combustão. É um processo que visa melhorar o aproveitamento energético do sistema.
- **Pré-aquecedor de ar a gás (Pré-ar):** de maneira análoga ao economizador, utiliza os gases da combustão para pré-aquecer o ar utilizado na queima do combustível com o mesmo objetivo.
- **Superaquecedor:** responsável por superaquecer o vapor a partir do vapor saturado. Consiste em serpentinas no alto da fornalha destinadas a aumentar a temperatura do vapor gerado. Normalmente, está atrelado à produção de energia elétrica pela passagem do vapor por uma turbina acoplada a um gerador.
- **Desaerador térmico:** responsável pela retirada de gases não condensáveis dissolvidos na água por meio do aquecimento, diminuindo assim a solubilidade do oxigênio e dióxido de carbono antes da entrada no tubulão.

2.3. Tratamento de água para utilização em caldeiras

Grande parte da vida útil de caldeiras está associada com a qualidade da água utilizada em seu interior. Sabe-se que a água dissolve vários óxidos, hidróxidos e gases, além de poder apresentar vários elementos suspensos, como óleos e materiais orgânicos, os quais podem prejudicar a operação segura da caldeira. Portanto, busca-se sempre água livre de sais ou presença de oxigênio, sem materiais suspensos, orgânicos, com alta temperatura e faixa ideal de potencial hidrogeniônico (pH).

O tratamento correto de água previne diversos fenômenos como a incrustação, fenômeno de deposição de sais de cálcio e magnésio, sílica ou materiais orgânicos nos tubos de água, tubulões, feixes de entrada e até em instrumentos e dispositivos de controle. Esse processo é comum e impede a transferência de calor para as superfícies, dificultando as trocas térmicas e reduzindo a eficiência energética da caldeira ao consumir maior volume de combustível. Ainda, a incrustação pode promover um superaquecimento dos tubos e gerar fissuras ou rupturas, podendo causar a parada do equipamento e, em casos extremos, sua explosão. Além disso, a utilização de água nas condições ideais previne processos corrosivos nos tubos de água e tubulões, assim como diversos outros fenômenos que reduzem a vida útil de equipamentos e colocam em risco a operação segura. Além disso, o tratamento básico da água envolve a retirada de impurezas e sólidos suspensos e pode variar dependendo do nível de complexidade do processo. Pode-se citar os principais processos de tratamento de água:

- **Clarificação e filtração:** adição de sulfato de alumínio, cloreto de ferro ou taninos modificados para flocular eletrostaticamente as impurezas, as quais sedimentam ao fundo; posteriormente, pode-se forçar a passagem da água por um filtro, o qual pode retirar outras substâncias em suspensão.
- **Abrandamento:** remoção de cálcio e magnésio por meio do uso de resinas, as quais promovem a troca de íons sódio (Na^+) ou hidrogênio (H^+).
- **Desmineralização:** processo de remoção de sílica e silicatos solúveis, carbonatos, sulfatos e sulfetos. A regeneração é feita utilizando soda cáustica (NaOH). Ainda, pode ocorrer a descarbonatação para a retirada de gás carbônico (CO_2).
- **Osmose reversa:** passagem de água por um permeador cilíndrico, o qual barra alguns sais em suas membranas seletivas e permite a passagem de água pura pelas suas radiais.

2.4. O eucalipto e sua importância econômica

Segundo informações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Agropecuária, o eucalipto teve grande crescimento de área reflorestada a partir da Lei de Incentivos Fiscais nos anos 60, durante o governo Castello Branco. Sua origem é da Oceania e é caracterizado pelo seu grande porte físico e ampla aplicabilidade, seja na extração de lenha e/ou cavaco, produção de

óleos naturais, indústrias moveleiras e de papel e celulose. Além disso, em várias regiões do país, a monocultura desenfreada de florestas de eucalipto é responsável por gerar desertificação e ressecamento de solos e maior exposição destes à erosão, fato este que representa um sério risco ambiental.

Nos dias de hoje, existe uma grande competição por florestas de eucalipto, dado o crescimento em várias regiões de indústrias de papel e celulose e crescimento de outros setores, aumentando a demanda exigida dessa madeira. Sendo assim, seu preço tem se elevado, de maneira geral, impactando diretamente no preço final de diversos produtos, impulsionando as empresas a buscarem outras opções para uso em seus processos industriais.

No caso analisado neste trabalho, chips de cavaco de eucalipto sem a casca são picados para servirem de combustível em caldeiras, a fim de produzir vapor saturado e atender diversas necessidades do processo de fábrica que envolvem trocas térmicas.

2.5. O cavaco de bambu como biomassa

Nos últimos anos, o aumento do conhecimento e da pesquisa sobre alguns aspectos das espécies de bambu tem tido um impacto econômico significativo, originando novos usos industriais. No entanto, o escasso conhecimento científico sobre as espécies de bambu, especialmente no que se refere à possibilidade de sua utilização como fonte de energia, tem restringido o pleno desenvolvimento da cultura nesta área. A energia da biomassa de bambu tem grande potencial, uma vez que pode ser processada de várias maneiras (conversão térmica ou bioquímica) para produzir diferentes produtos energéticos (carvão, gás e biocombustíveis), que podem substituir os produtos provenientes dos combustíveis fósseis (TRUONG; LE, 2014).

Neste sentido, ações e projetos de pesquisa que tenham por objetivo avaliar as características energéticas de diferentes espécies de bambu são fundamentais para o desenvolvimento desta importante área. Uma das ações governamentais nesta área foi a instituição da Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB), Lei 12.484 de 2011 (BRASIL, 2011), que tem como objetivo principal o desenvolvimento da cultura do bambu no Brasil, colocando esta cultura como fundamental para o desenvolvimento econômico e social do país. Há na literatura

trabalhos que avaliaram a produção de carvão vegetal a partir da biomassa de espécies de bambu e suas características energéticas (BRITO et al. 1987; SCURLOCK et al., 2000; COSTA, 2004; VARANDA et al., 2010; MOREIRA, 2012).

Adiante, pode-se explorar as diversas vantagens do uso do bambu, sejam elas energéticas, sustentáveis, ambientais e econômicas. Estima-se que o bambu é um vegetal com mais de 200 milhões de anos e mais de 1300 espécies representando cerca de 3% das florestas mundiais, segundo dados da INBAR (International Network for Bamboo and Rattan) e esse vegetal é cultivado em larga escala na China e na Índia nas indústrias de celulose, seu uso mais comum atualmente. O Brasil é o país com maior diversidade em espécies de bambu nas Américas, com 34 gêneros e 232 espécies, das quais 75% (174 espécies) são consideradas endêmicas (FILGUEIRAS; GONÇALVES, 2004).

A maior floresta nativa de bambu no mundo encontra-se no Acre, com cerca de 4,5 milhões de hectares dos 9 milhões de hectares presentes na América do Sul, segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Portal Amazônia. Ainda, segundo a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, a ocorrência de florestas nativas - em torno de 161.500 km² - no sudoeste da Amazônia têm oferecido riscos devido à possibilidade de invasão do bambu na parte ocidental decorrente da exploração madeireira.

O bambu é um material resistente, renovável e adaptado ao clima do Brasil. Um fator importante é que o bambu é uma planta perene e na maioria das vezes, não necessita de replantio por longos anos por se reproduzir por brotamento a partir de rizomas subterrâneos. Logo, os custos com mão de obra e insumos são reduzidos e o solo não sofre tantos processos de erosão associados ao manejo em larga escala. Estima-se que uma moita é capaz de gerar 10 novos colmos por ano, desde que tenham os nutrientes e espaço adequados para tal. Existem, ainda, dois tipos diferentes de bambu: simpodial e monopodial. O primeiro é um tipo entouceirante, ou seja, vários rizomas são derivados a partir de um central, formando vários “galhos” e ramificações na mesma estrutura, ocupando menor espaço por área, diferentemente do segundo tipo, que é alastrante. Considera-se ainda um tipo semi-entouceirante, o qual é uma junção básica dos dois tipos.

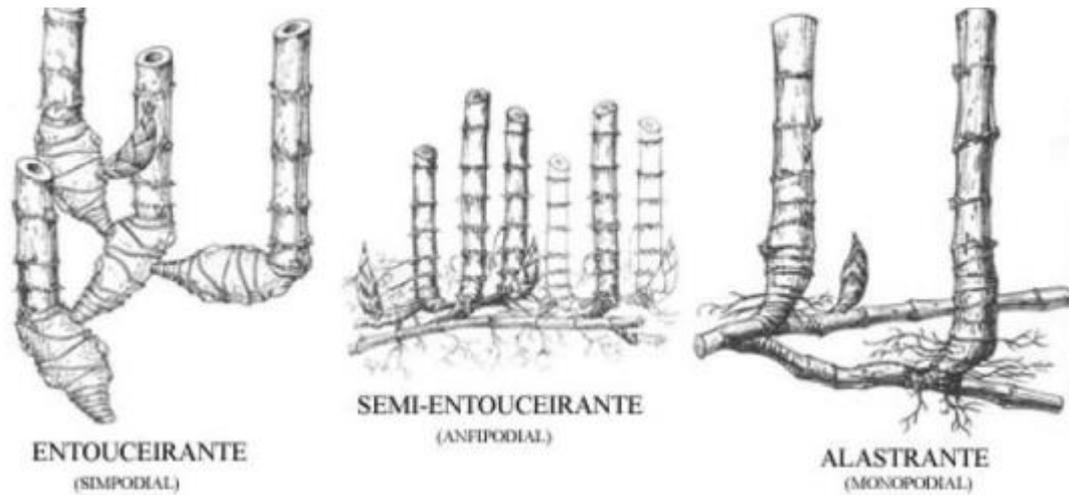


Figura 2: Diferentes tipos de bambu

Acredita-se que a reprodução e crescimento acelerado do bambu ocorre pela eficiência do processo de fotossíntese facilitado pela presença de folhas caulinares conectadas à bainha. Ainda, a capacidade de reposição foliar é alta e as folhas que se depositam no solo previnem a possibilidade de plantas invasoras impedirem seu desenvolvimento.

É uma planta utilizada em aplicações diversas já que suas fibras densas e resistentes lhe conferem maleabilidade e rigidez. Pode ser usado na área de construção civil (móveis, pisos, revestimentos, forros, brises, pérgolas), fabricação de papel e sacarias, tecidos, ornamentação e artesanato (cestos, telas de pintura, luminárias) e inclusive como alimento, a partir dos brotos.

3. METODOLOGIA

3.1 Análise elementar do cavaco de bambu e poder calorífico

O trabalho visa comparar a performance para a queima em caldeira da biomassa de bambu e compará-la com a de eucalipto, já utilizada atualmente. Existem diversos parâmetros importantes relacionados à queima de biomassa. Nesse sentido, para efeitos termodinâmicos, destaca-se:

- **Poder Calorífico Superior:** quantidade máxima de energia que o combustível pode oferecer.
- **Poder Calorífico Inferior:** leva em conta a energia gasta para evaporar a umidade que o combustível possui mais a umidade gerada pela combustão, a qual está relacionada com o teor de hidrogênio presente.

3.2 Comparativo – Análise química do cavaco de eucalipto e cavaco de bambu

A fim de realizar uma análise mais confiável da composição química e das propriedades do cavaco de bambu, enviou-se uma amostra em abril de 2022 para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em São Paulo. A amostra em questão era da espécie *Bambusa vulgaris* colhida numa floresta do Maranhão e os resultados foram comparados com 3 amostras de cavaco de eucalipto analisadas pelo mesmo laboratório em janeiro de 2020.

Vale ressaltar que o laboratório em questão apontou todos os laudos de calibração dos equipamentos utilizados e os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados com base na ASTM D5373-16, método A; o teor de oxigênio, pelo ASTM D3176-15; enxofre total pelo ASTM D4239-17, método A; o teor de cinzas pelo ASTM D1102-84; teor de materiais voláteis pelo ASTM D1762-84 (13); carbono fixo, ASTM D3172-13; Poder Calorífico pelo ASTM D5865/D5865M-19 e teor de umidade pelo ASTM E871-82(13). Sendo assim, os resultados, com intervalo de confiança de 95% são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre análises imediata e elementar de amostras de eucalipto e bambu

Comparativo bambu vs eucalipto			
Material seco	Eucalipto	Bambu	Comparativo
Carbono % massa	49.57	48.9	1.34%
Hidrogênio - %massa	6.16	6.21	0.81%
Nitrogênio	0.20	0.30	50.00%
Oxigênio	43.97	42.68	2.94%
Enxofre	< 0.1	0.11	10.00%
Cinzas % massa	0.10	1.80	1700.00%
Materiais voláteis -% massa	82.30	81.10	1.46%
Carbono fixo % massa	17.60	17.10	2.84%
Poder Calorífico Superior - MJ/kg	19.63	19.65	0.08%
Poder Calorífico Inferior - MJ/kg	18.31	18.31	0.02%

A análise realizada pelo laboratório demonstra que existem certas variações entre os dois tipos de biomassa, mas verifica-se que as amostras são muito próximas (Tabela 3). A maior disparidade existente foi em relação ao nível de cinzas, sendo que no bambu o teor é 17 vezes maior após a combustão. Os resultados obtidos eram parcialmente esperados, visto as análises bibliográficas realizadas acerca da composição do bambu.

Em seguida, realizou-se a análise de sílica das cinzas do bambu e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4. O método utilizado para a determinação foi o DIN EM ISO 16967:2015 a 550°C na base seca. Os equipamentos utilizados foram o espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado ICP-OES e a calibração com materiais de referência certificados por produtor com acreditação ISO 17034 (2016); balança analítica e forno mufla de calibração RBC.

Tabela 2: Nível de óxido de silício presente nas cinzas do cavaco de bambu

Bambu	
Composto	Concentração
	Amostra 490/22
Si (Silício)	3343 mg.kg ⁻¹
SiO ₂ (Sílica)	31 - 49 %

Em geral, tendo como base o resultado das amostras, observa-se que não ocorre diferenças muito grandes entre os dois tipos de biomassa. Os valores de poder calorífico para o bambu no material seco foram levemente superior ao de eucalipto devido à menor quantidade de umidade. A disparidade encontrada em relação ao volume de cinzas não

será um problema, caso os níveis de emissão de particulados estejam dentro do exigido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

3.3 Plantio, colheita e picagem do eucalipto e do bambu

O processo de produção do cavaco de bambu é muito semelhante ao do eucalipto. A fase de implantação consiste no preparo do solo por meio de correção de pH, adubação inicial, planeio e plantio das mudas, as quais podem passar por um processo de análise de sementes a fim de verificar as condições de germinação. A fase de operação consiste nas manutenções a serem feitas na plantação, como capina, adubação, utilização de defensivos agrícolas para combate de pragas. Em média, realiza-se o plantio de 480 mudas por ha e 40 cm abaixo do solo.

A operação do eucalipto consiste no corte pelos maquinários (usualmente, *feller buncher*) das árvores e, após a colheita, as toras de eucalipto são arrastadas por *skidders* e dispostas ao ambiente durante 1 a 3 meses para reduzir a umidade. Em seguida, são levadas até o picador para que sejam transformadas em chips de 20 mm x 30 mm, em média.

As figuras 3 e 4 referem-se às fases de colheita, transporte e picagem do bambu. A operação inicia-se pelo corte manual do bambu e os caules são movimentados com a ajuda dos *skidders* e colocados nos caminhões para transporte ou direto nos picadores. Vale ressaltar, no entanto, que o bambu por ter menor umidade pode dispensar o tempo de espera antes da picagem.



Figura 3: Operação com cavaco de bambu



Figura 4: Picagem do bambu

3.4 Caldeira utilizada para teste com cavaco de bambu

A caldeira utilizada para os testes (Figura 5) foi fabricada em 2013 pela Biocal, é do tipo aquatubular, modelo MGV-40000-CA com capacidade de produção de vapor de 40.000 kg/h de vapor saturado a uma pressão inicial de trabalho de 15 bar. A pressão de teste hidrostático é de 79,5 bar e sua pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) de 53 bar, sendo que sua potência térmica nominal, ou seja, a quantidade de energia fornecida pela combustão (produto entre o fluxo máximo de combustível na entrada e o poder calorífico superior) é de 67,3 MW. O combustível utilizado era unicamente o cavaco de eucalipto. O sistema de alimentação de combustível da caldeira é composto por um silo de biomassa, 5 roscas de alimentação de combustível e 2 roscas espalhadoras.



Figura 5: Foto panorâmica da caldeira em que foi realizado o teste

O balanço energético do sistema para a caldeira analisada foi realizado com base no fluxograma da Figura 6 e as definições e equações foram setadas no software EES e as linhas de código encontram-se no Apêndice C. A temperatura, pressão, vazão mássica e entalpia foram definidas para os pontos da figura.

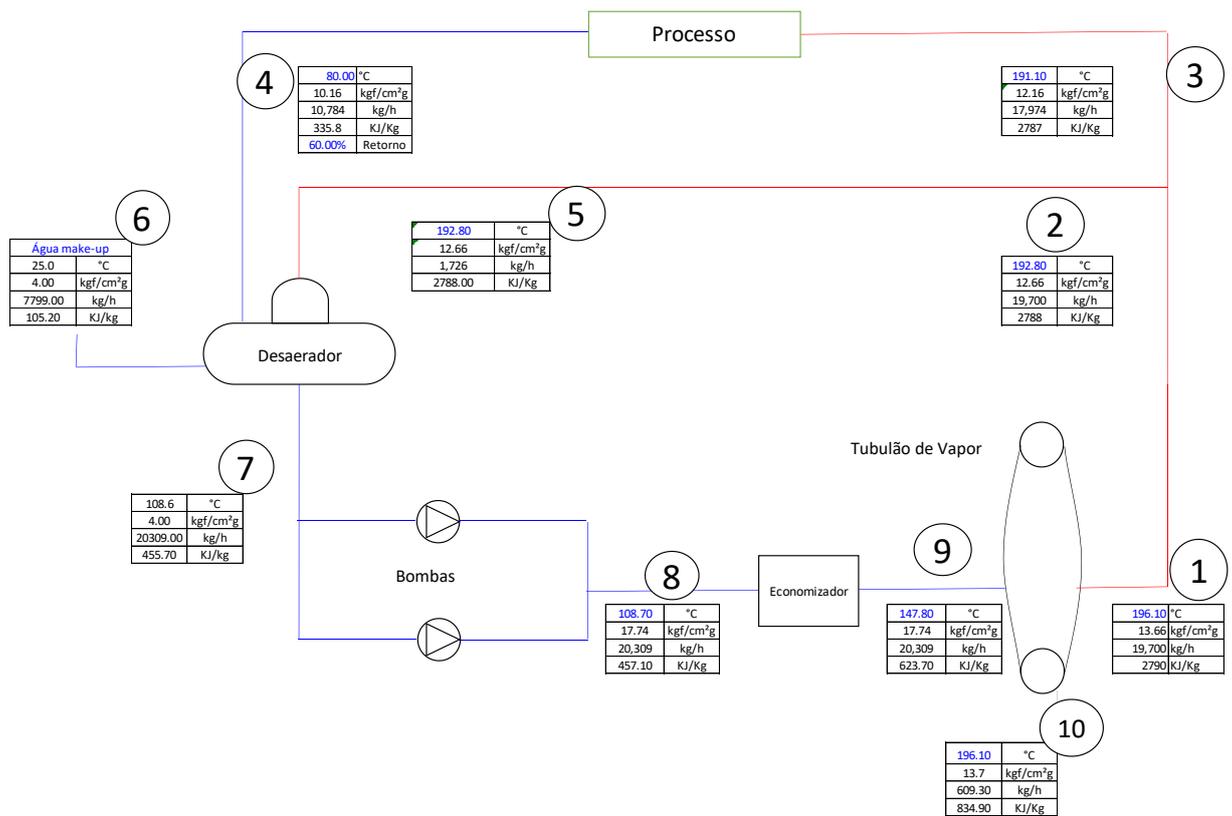


Figura 6: Fluxograma da Caldeira

- **Ponto 1:** Saída do tubulão
- **Ponto 2:** Linha de vapor
- **Ponto 3:** Entrada do processo
- **Ponto 4:** Saída do processo
- **Ponto 5:** Entrada desaerador
- **Ponto 6:** Água make up
- **Ponto 7:** Entrada bombas
- **Ponto 8:** Saída bombas
- **Ponto 9:** Saída economizador
- **Ponto 10:** Purga

Além disso, a grelha da caldeira é do modelo recíprocante, na qual há alternância entre linha com movimento e estática para promover a movimentação do combustível na grelha, com a primeira seção sendo a de secagem, a segunda de combustão e terceira para término de combustão e descarte de cinzas. A caldeira também é dotada de economizador, pré aquecedor de ar, dois multiciclones, ventiladores primário, secundário e de exaustão e por fim, chaminé.

3.4.1. Fluxograma de água de alimentação

Após o processo de tratamento, têm-se a chegada de água abrandada no desaerador juntamente com a água advinda da linha de retorno de condensado (Figura 7). Essa água sofre um pré aquecimento usando vapor para que ocorra a diminuição da solubilidade de gases dissolvidos, especialmente oxigênio. Em seguida, é bombeada para o economizador, o qual será responsável por elevar sua temperatura utilizando-se dos gases residuais quentes da queima e entra no tubulão superior. A circulação da água na caldeira ocorre de maneira natural, tendo em vista que a água vai se aquecendo nos tubos da fornalha. Dessa forma, o aumento do volume reduz sua densidade, favorecendo seu deslocamento até o tubulão. A fim de reduzir a concentração de minerais e sílica do tubulão de vapor, ainda, ocorre a descarga contínua e a descarga de fundo para a retirada de lama ou outros componentes indesejáveis. Essas descargas representam a purga da caldeira.

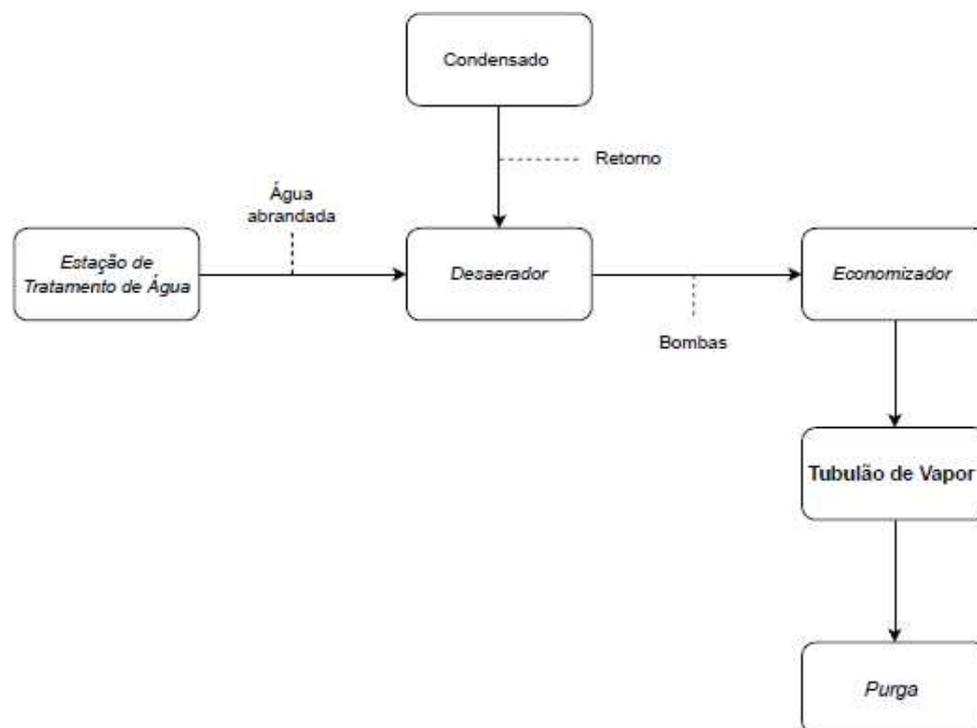


Figura 7: Fluxograma de água de alimentação

3.4.2. Fluxograma de combustível

O cavaco é despejado pela pá carregadeira na tremonha de recepção e segue para a esteira transportadora (Figura 9). Em seguida, passa pela peneira de discos - responsável por retirar grande parte de impurezas do combustível - e é enviado para o armazém de cavaco em outra esteira (Figura 10). Deste local, o combustível é enviado até o silo pulmão próximo à fornalha e lá sofrerá a ação de 5 roscas dosadoras, as quais regulam a quantidade de combustível que é despejado na grelha para a queima (Figura 8). As cinzas são originárias da parte não queimada deste combustível no grelhado.

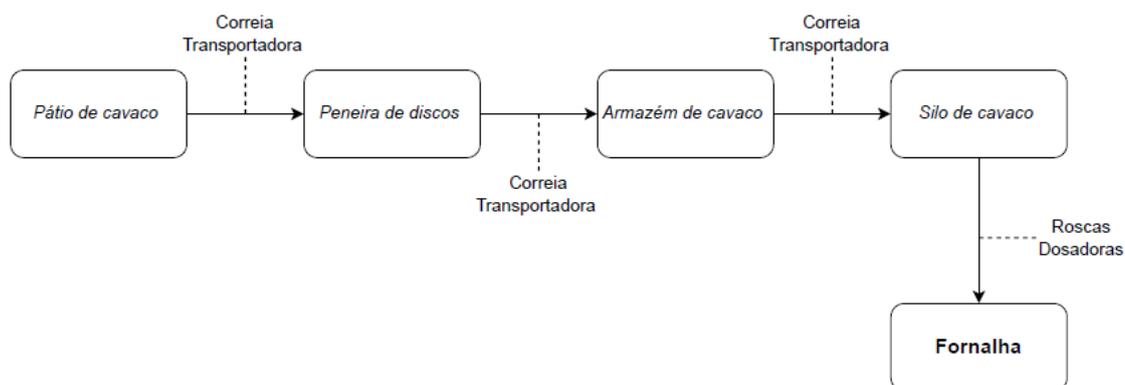


Figura 8: Fluxograma de combustível



Figura 9: Cavaco de bambu sendo despejado na tremonha

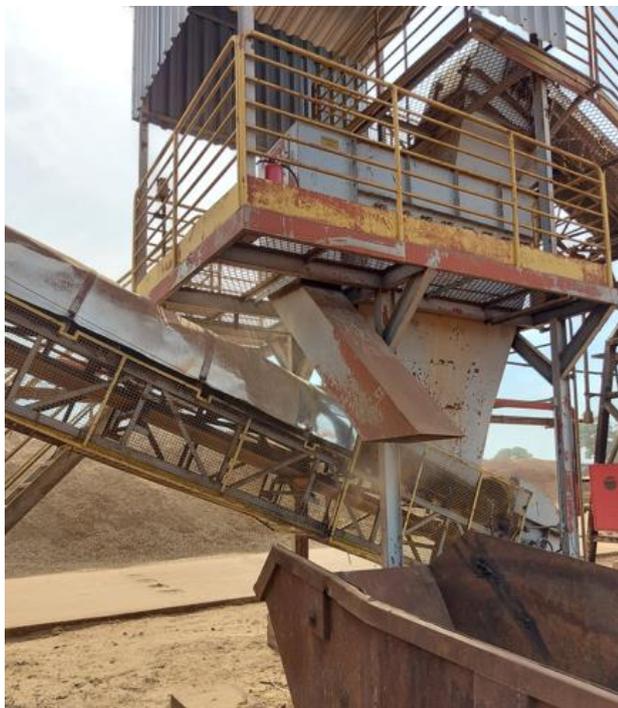


Figura 10: Peneira de discos no sistema de alimentação

3.4.3. Fluxograma de ar e gases

O ar primário é insuflado para o pré aquecedor de ar, o qual sofre aquecimento pelos gases residuais de combustão. Em seguida, é direcionado e deslocado até a parte de baixo do grelhado, a fim de prover o oxigênio necessário para a reação de combustão. Já o ar secundário é insuflado (Figura 12) diretamente até a fornalha para promover a circulação do combustível suspenso durante a queima e redução de combustão incompleta. O fluxograma de ar e gases é representado na Figura 11.

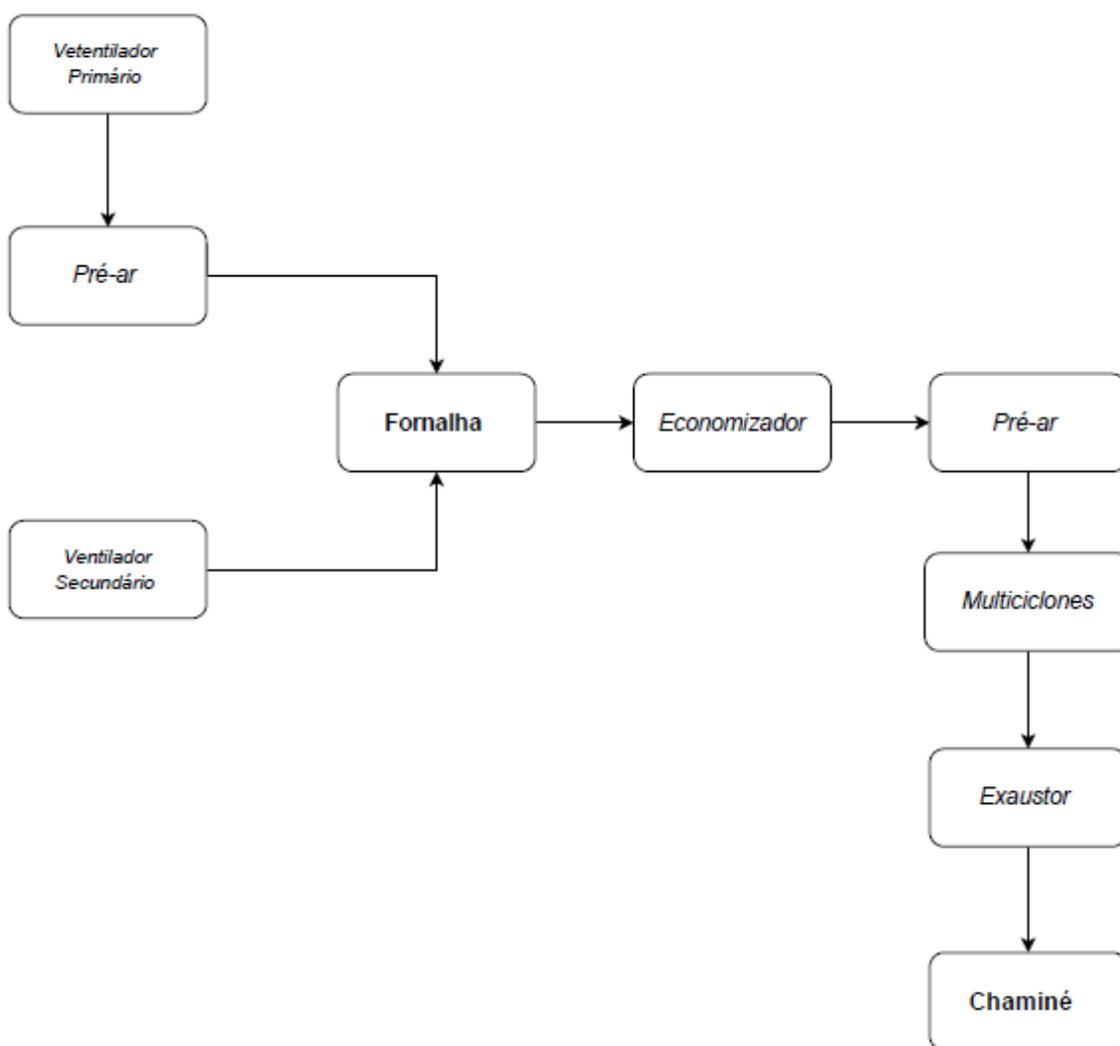


Figura 61: Fluxograma de Ar e Gases



Figura 12: Ventilador primário (à esquerda) e ventilador secundário (à direita)

3.4.4. Fluxograma de cinzas

Grande parte das cinzas são retiradas ao fim da passagem do combustível pelas grelhas na fornalha e caem no redler. No entanto, o ar deslocado pelo sistema de tiragem – promovido pelo exaustor – também contém cinzas em suspensão e se depositam no economizador e no pré ar e vão se depositando no fundo dos equipamentos pela ação da gravidade. Sendo assim, por meio das esclusas, elas são direcionadas para o redler (Figura 13). Por fim, os multiclones realizam a retirada de cinzas mais finas que ainda se mantêm no ar por meio da força centrífuga (Figura 14).

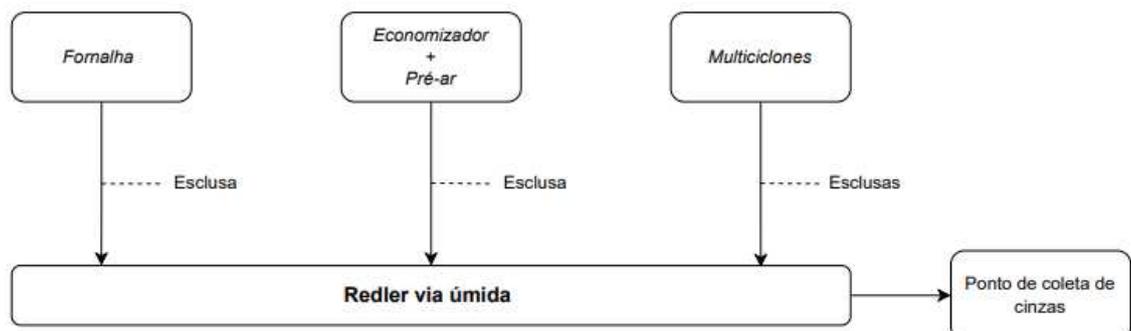


Figura 13: Fluxograma de Cinzas



Figura 147: *Redler* coletor de cinzas

3.4.5. Fluxograma de vapor

O vapor é formado nos tubos de troca térmica é separado no tubulão e segue para utilização no processo de produção da indústria, sendo que as linhas sofrem distribuição a partir do coletor de vapor. Além disso, uma pequena parte do vapor produzido é desviado para aquecer o desaerador térmico. Após a utilização no processo, grande parte desse vapor é condensado e retorna na forma de água quente para ser usada também no desaerador (Figura 7).

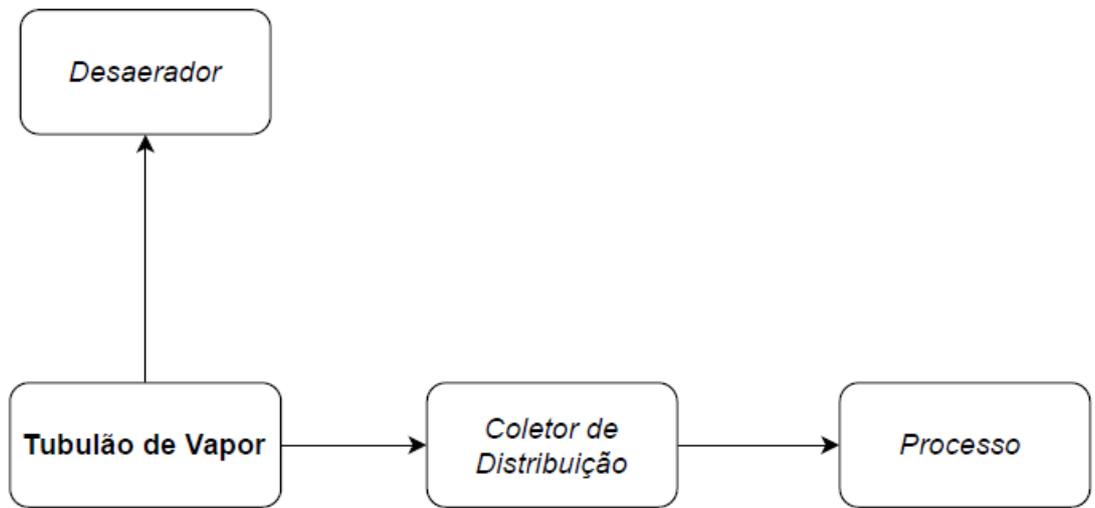


Figura 85: Fluxograma de Vapor

4. RESULTADOS

O teste consistiu na alimentação da caldeira com uma mistura de cavaco composta por 50% de cavaco de eucalipto e 50% de cavaco de bambu. Antes da realização do teste a caldeira estava operando normalmente com 100% de cavaco de eucalipto e diversos parâmetros do supervisão foram coletados para ter a linha de base nas condições normais. Vale ressaltar que houve certa dificuldade em avaliar os dois combustíveis para exatamente as mesmas condições de consumo da fábrica, visto que a vazão de vapor é alterada pelo processo a todo instante. No entanto, foi selecionado um período em que a vazão da fábrica se manteve próxima para as duas condições e a tabela de coleta encontra-se a seguir.

Tabela 3: Resultados coletados entre 7:40 até 9:46 para queima de cavaco de eucalipto

Descrição/Tag		Eucalipto - Dados 08/09/2022				
		Média	Desvio Padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitude
Pressão de vapor	bar	13,40	0,57	12,20	15,20	3,00
Vazão de vapor	t/h	19,73	1,02	18,00	22,00	4,00
Pressão do balão	bar	13,87	0,53	12,80	15,60	2,80
Temperatura embaixo da grelha - hopper 1	°C	97,04	7,06	88,50	113,30	24,80
Temperatura embaixo da grelha - hopper 2	°C	125,40	6,94	115,40	139,20	23,80
Temperatura embaixo da grelha - hopper 3	°C	81,68	7,68	75,30	120,20	44,90
Temperatura na saída da fornalha	°C	352,76	11,57	328,00	381,60	53,60
Temperatura dos gases após economizador	°C	176,33	9,00	133,70	190,90	57,20
Temperatura dos gases na chaminé	°C	147,89	4,40	138,50	156,80	18,30
Pressão da fornalha	mmca	-3,08	0,58	-4,90	-1,90	3,00
Pressão dos gases na saída da fornalha	mmca					
Pressão dos gases após economizador	mmca	-29,31	5,61	-43,10	-18,10	25,00
Pressão dos gases após multiciclone	mmca	-86,06	18,40	-129,50	-55,80	73,70
Fluxo de cavaco	m³/h	24,86	11,75	1,00	47,00	46,00
Inversor do ventilador secundário	%	19,68	4,98	0,00	30,00	30,00
Abertura do damper do ventilador primário	%	29,32	15,84	0,00	72,70	72,70
Abertura do damper do exaustor	%	24,17	5,51	10,90	40,90	30,00
Temperatura da água de alimentação da caldeira	°C	147,78	3,23	138,50	153,40	14,90
Temperatura do desaerador	°C	108,67	0,43	108,10	109,50	1,40
Nível do tubulão de vapor	%	52,23	1,95	46,60	57,50	10,90

A densidade do cavaco de eucalipto que estava sendo queimado na caldeira na parte da manhã era de aproximadamente 255 kg/m³ e umidade média entre 25 % e 30%. Quando o combustível foi alterado para a mistura, obteve-se uma densidade média de 234,29 kg/m³. A taxa de amostragem dos valores do supervisão foi de 4 minutos.

Tabela 4: Resultados coletados entre 10:20 até 14:59 para queima de cavaco mix, 50% cavaco eucalipto e 50% cavaco de bambu

Descrição/Tag		Mix - Dados 08/09/2022				
		Média	Desvio Padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitude
Pressão de vapor	bar	13,39	0,58	11,90	15,10	3,20
Vazão de vapor	t/h	17,85	1,95	14,00	21,20	7,20
Pressão do balão	bar	13,96	0,61	12,50	15,70	3,20
Temperatura embaixo da grelha - hopper 1	°C	107,66	5,90	98,40	118,60	20,20
Temperatura embaixo da grelha - hopper 2	°C	142,48	2,67	132,20	147,70	15,50
Temperatura embaixo da grelha - hopper 3	°C	133,19	12,06	113,90	153,50	39,60
Temperatura na saída da fornalha	°C	328,41	13,30	302,80	362,00	59,20
Temperatura dos gases após economizador	°C	165,49	6,13	154,30	179,80	25,50
Temperatura dos gases na chaminé	°C	136,86	3,93	130,50	147,00	16,50
Pressão da fornalha	mmca	-2,90	0,67	-4,60	-1,40	3,20
Pressão dos gases após economizador	mmca	-22,60	4,92	-37,50	-12,40	25,10
Pressão dos gases antes multiciclone	mmca	-66,16	11,94	-107,00	-40,80	66,20
Inversor do ventilador secundário	%	28,53	7,57	17,70	60,00	42,30
Abertura do damper do ventilador primário	%	27,64	9,30	5,80	58,20	52,40
Abertura do damper do exaustor	%	20,12	2,66	12,50	28,20	15,70
Temperatura da água de alimentação da caldeira	°C	143,45	2,06	138,20	149,90	11,70
Temperatura do desaerador	°C	108,73	0,70	107,30	109,80	2,50
Nível do tubulão de vapor	%	51,79	1,56	47,00	56,00	9,00

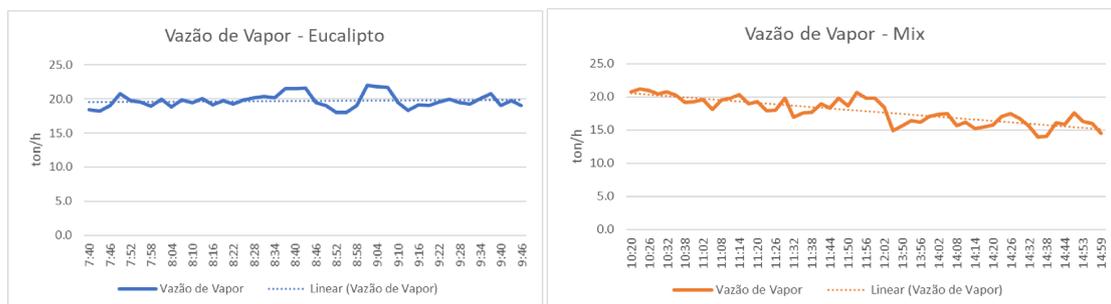


Figura 96: Comparativo da vazão de vapor consumida pela fábrica, em ton/h queimando cavaco de eucalipto (gráfico à esquerda) e mistura 50% de cavaco de eucalipto e 50% bambu (à direita)

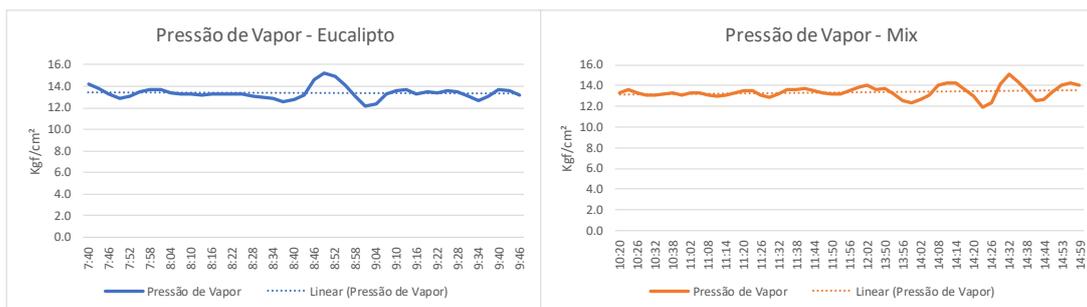


Figura 107: Comparativo da pressão de vapor produzida pela caldeira, em kgf/cm².g queimando cavaco de eucalipto (gráfico à esquerda) e mistura 50% de cavaco de eucalipto e 50% bambu (à direita)

É possível verificar que mesmo com uma redução de 25% no consumo da fábrica durante o período analisado, a pressão de vapor manteve-se estável, indicando a estabilidade da caldeira (Figuras 16 e 17).

4.1. Balanço energético do sistema

O cálculo da eficiência da caldeira pelo método direto considera os fluxos energéticos de entrada e saída, mensurando sua capacidade de formar vapor a partir da água de entrada. Nesse sentido, a eficiência energética do equipamento é a razão entre a energia líquida gerada e a energia total consumida. Sendo assim, pode-se escrever:

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m}v \cdot hv) + (\dot{m}p \cdot hp) - (\dot{m}a \cdot ha)}{(\dot{m}c \cdot PCS)} \quad \text{Eq.(1)}$$

- ε = eficiência ao PCS pelo método direto
- $\dot{m}v$ = vazão mássica de vapor na linha principal
- hv = entalpia do vapor saturado
- $\dot{m}p$ = vazão mássica de purga
- hp = entalpia da purga
- $\dot{m}a$ = vazão mássica da água de alimentação
- ha = entalpia da água de alimentação
- $\dot{m}c$ = vazão mássica de combustível

- PCS = poder calorífico superior do combustível

A vazão mássica de combustível pode ser expressa por:

$$\dot{m}_c = \Phi_c * \rho_c \left[\frac{kg}{h} \right] \quad \text{Eq.(2)}$$

- Φ_c = vazão volumétrica do combustível
- ρ_c = densidade do combustível

Logo, é possível escrever:

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m}_v * h_v) + (\dot{m}_p * h_p) - (\dot{m}_a * h_a)}{(\Phi_c * \rho_c * PCS)}$$

Tendo como base a eficiência da caldeira ao PCS, é possível encontrar o fluxo necessário de entrada de combustível para produzir o vapor nas mesmas condições, considerando as diferenças de poder calorífico e densidade dos dois combustíveis. A eficiência foi fixada em 73,20 %, conforme indicado pelo manual da caldeira.

Caso 1: Caldeira operando com cavaco de eucalipto

$$0,732 = \frac{(19700 \left[\frac{kg}{h} \right] * 666,38 \left[\frac{kcal}{kg} \right]) + (609,3 \left[\frac{kg}{h} \right] * 202,23 \left[\frac{kcal}{kg} \right]) - (20310 \left[\frac{kg}{h} \right] * 144,0 \left[\frac{kcal}{kg} \right])}{(\Phi_c * 255,0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 4560 \left[\frac{kcal}{kg} \right])}$$

$$\Phi_c = 12,13 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Portanto, conclui-se que a vazão de cavaco de eucalipto demandado é de 12,13 m^3/h para gerar vapor saturado a 196 °C, aproximadamente.

Caso 2: Caldeira operando com mix (50% cavaco de eucalipto e 50% cavaco de bambu)

$$0,732 = \frac{(19700 \left[\frac{kg}{h} \right] * 666,38 \left[\frac{kcal}{kg} \right]) + (609,3 \left[\frac{kg}{h} \right] * 202,23 \left[\frac{kcal}{kg} \right]) - (20310 \left[\frac{kg}{h} \right] * 144,0 \left[\frac{kcal}{kg} \right])}{(\Phi_c * 234,29 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 4628 \left[\frac{kcal}{kg} \right])}$$

$$\phi_c = 13,01 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Diante do exposto, verifica-se que o fluxo de cavaco mix demandado é de 13,01 m^3/h para gerar vapor nas mesmas condições do primeiro caso e que o mix consome cerca de 7% a mais de combustível em volume que o cavaco de eucalipto, neste cenário. Além disso, alguns ajustes foram realizados a fim de regular o tempo de permanência do mix dentro da fornalha e minimizar a quantidade de não queimados, ou seja, carbono remanescente.

4.2. Resultado Ambiental – Emissão de particulados

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, por meio das resoluções n° 382/06 e n° 436/11 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para diferentes fontes fixas. Nesse sentido, durante a fase de testes com a mescla entre cavaco de bambu e eucalipto realizou-se a análise de emissão dos particulados na chaminé da caldeira, a fim de verificar se os níveis encontram-se dentro dos permitidos pela norma brasileira. Tendo como base as informações expostas no item 4.4, tem-se que a potência térmica nominal da caldeira é de 67,3 MW.

A análise foi realizada por empresa terceira, com o intuito de avaliar as emissões de fontes estacionárias pelo método de amostragem isocinética. Para tal, foram utilizados o Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA) e um analisador de gases instantâneo e a média dos resultados para os 3 pontos de coleta foram:

Tabela 5: Resultado médio de emissões de particulado para queima com cavaco mix em 3 pontos de coleta

MÉDIA DOS RESULTADOS				
Parâmetro	Equipamento	Padrão	RESULTADO	Unidade
Temp. Chaminé	CIPA	—	138,60	°C
CO	OPTIMA 7	N.P	0,03	%
NO _{x(1)}	OPTIMA 7	650	140,00	*mg/Nm ³
SO ₂	CIPA	N.P	38,87	*mg/Nm ³
M. Particulado	CIPA	260	249,03	*mg/Nm ³

Tabela 6: Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira.

Potência térmica nominal (MW)	MP(1)	Nox ⁽¹⁾ (como NO ₂)
Menor que 10	730	N.A.
Entre 10 e 30	520	650
Entre 30 e 70	260	650
Maior que 70	130	650

*(1) os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.
N.A. - Não aplicável.*

Conforme demonstrado na Tabela 5, a chaminé da apresentou padrão de emissão dentro do limite permitido imposto pelo Anexo IV da Resolução CONAMA n° 382, de 26 de dezembro de 2006, para os parâmetros Material Particulado (MP) e NOx (NO₂).



Figura 18: Filtros utilizados na análise de emissão de particulados para o mix de cavaco

4.3. Outros resultados

O principal receio em relação ao cavaco de bambu estava associado ao seu comportamento nos sistemas de alimentação, dado que a quantidade de impurezas poderia travar as correias transportadoras e embuchar ou formar covis nas roscas dosadoras no silo de cavaco, mesmo após a passagem pela peneira de discos. Isso poderia acontecer porque foi notado que o cavaco de bambu fornecido possuía varetas pequenas, as quais poderiam passar pela peneira sem ser retiradas (Figuras 19 e 20).



Figura 19: Varetas presentes no cavaco de bambu



Figura 20: Varetas retiradas pela peneira de discos

Durante o início do teste, de fato, houve a formação de covis em 1 das 5 roscas dosadoras devido a presença de varetas. Isso compromete a quantidade necessária de combustível exigida pela fornalha, fazendo com que ocorra queda na produção de vapor pela caldeira. No entanto, o problema foi resolvido ajustando o nível de silo de cavaco e posteriormente, não foram percebidos durante a continuação do teste e nos dias subsequentes em que a caldeira continuou a operar com o mix de cavaco. Esse ajuste foi realizado diminuindo o volume de cavaco dentro do silo por meio da redução de velocidade das correias transportadoras que despejam o cavaco nele.

Outro ponto notado foi acerca dos resíduos liberados pelo cavaco de bambu embaixo do sistema de correias transportadoras (Figura 21). Pelo fato dele ser mais seco, ocorre mais facilmente o desprendimento de pedaços na parte externa do chip, sendo eliminados durante sua movimentação.



Figura 21: Resíduos liberados pelo cavaco de bambu no pátio, abaixo das correias transportadoras

Este fato pode oferecer relativo risco à segurança operacional em locais fechados, uma vez que o acúmulo desse pó seco pode se incendiar diante de uma fonte de ignição. No caso estudado esse risco torna-se baixo, já que o sistema de alimentação é espaçoso e realizado em área aberta. Mesmo assim, aumento nas rotinas de housekeeping e limpeza das correias transportadoras serão necessárias.

4.4. Análise econômica – Plantio próprio do bambu

Com base na tabela de custo de implantação e manutenção de florestas de eucalipto, apresentadas no Apêndice A e de bambu, no Apêndice B, verificou-se a diferença econômica entre os dois tipos de biomassa. Para realizar tal análise é necessário compreender que o ciclo do eucalipto para ser usado como biomassa dura em média 6 anos, tempo hábil para amadurecimento e adequações de fibras, colmos, níveis de carbono e umidade. Logo, ao fim desse período a floresta é derrubada e para a implantação de outra, novas mudas são necessárias.

No entanto, para o bambu é diferente. Geralmente, o primeiro ciclo ocorre em 3 anos e as varetas são cortadas a 20 cm do solo, o que permite um novo ciclo sem a necessidade de gasto com novas mudas, visto à capacidade de rebrota. A partir daí, os ciclos seguintes passam a ser com 2 anos.

Tabela 7: Custo por hectare e produtividade, em toneladas para primeiros 5 ou 6 anos.

Eucalipto					Bambu						
6 anos	Ciclo	Custo/ha	Produtividade (ton)	R\$/ton	5 anos	Ciclo		Custo/ha	Produtividade (ton)	R\$ 130.70	
	1°	R\$ 13,172.96	120	R\$ 109.77		3 anos	1°	R\$ 10,922.70	50		2 anos
						-	R\$ 13,069.70	100			

Tabela 8: Custo por hectare e produtividade, em toneladas 6 anos subsequentes.

Eucalipto					Bambu						
+ 6 anos	Ciclo	Custo/ha	Produtividade (ton)	R\$/ton	+ 6 anos	Ciclo		Custo/ha	Produtividade (ton)	R\$ 42.94	
	1°	R\$ 13,172.96	120	R\$ 109.77		2 anos	3°	R\$ 2,147.00	50		2 anos
						2 anos	5°	R\$ 2,147.00	50		

Tabela 9: Custo por hectare/ ano para 12 anos do eucalipto e 11 anos do bambu

Eucalipto					Bambu				
Total (12 anos)	Ciclos	Custo total	Produtividade total	R\$/ton	Total (11 anos)	Ciclos	Custo total	Produtividade total	R\$/ton
		2	R\$ 26,345.92	240		R\$ 109.77		5	R\$ 19,510.70
	Total		Custo/ ha.ano	R\$ 2,195.49		Total		Custo/ha.ano	R\$ 1,773.70

Tendo como base essa diferença, analisou-se os custos por hectare por ano para 2 ciclos do eucalipto, ou seja, 12 anos, e 5 ciclos do bambu, totalizando 11 anos. Dessa maneira é possível analisar de fato as vantagens do uso do bambu, uma vez que a partir daí nota-se o impacto da ausência de implantação de novas mudas no custo.

Portanto, verifica-se uma projeção de redução de 19,22% no custo de biomassa por hectare no ano. Essa diferença pode ser bem mais discrepante caso seja comparado um período maior de tempo, visto aos impactos dos custos de implementação nas florestas de eucalipto a cada ciclo, o que traria uma projeção de redução de custos bem maior. No entanto, utilizou-se os custos demonstrados na Tabela 9 para calcular os *savings* relacionados à área da floresta na tabela e no gráfico a seguir.

Tabela 10: Comparativo de custos de florestas de bambu e eucalipto para diversos hectares

Hectares	Eucalipto		Bambu		Economia
1000	R\$	2.195.493	R\$	1.773.700	R\$ 421.793
2000	R\$	4.390.987	R\$	3.547.400	R\$ 843.587
3000	R\$	6.586.480	R\$	5.321.100	R\$ 1.265.380
4000	R\$	8.781.973	R\$	7.094.800	R\$ 1.687.173
5000	R\$	10.977.467	R\$	8.868.500	R\$ 2.108.967
10000	R\$	21.954.933	R\$	17.737.000	R\$ 4.217.933
15000	R\$	32.932.400	R\$	26.605.500	R\$ 6.326.900
20000	R\$	43.909.867	R\$	35.474.000	R\$ 8.435.867
25000	R\$	54.887.333	R\$	44.342.500	R\$ 10.544.833
30000	R\$	65.864.800	R\$	53.211.000	R\$ 12.653.800

5. CONCLUSÃO

O resultado do teste foi positivo e é possível comprovar isso por diversos fatores. Inicialmente, obteve-se a proximidade entre a composição química dos combustíveis, exceto para a quantidade de cinzas. No entanto, essa maior quantidade de cinzas presentes no bambu não foram um problema, dado que os controles operacionais da caldeira foram suficientes para retirá-las e manter o particulado na saída da chaminé dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira. Outro ponto verificado foi durante o teste: mesmo após a alteração do combustível, a pressão de vapor manteve-se estável e sua operação e tempo de resposta mantiveram-se praticamente inalteráveis. Além deste, pode-se citar o cálculo realizado para o volume de combustível necessário no balanço energético do sistema, dada a eficiência da caldeira: os volumes encontrados para os dois cenários foram muito pouco diferentes, dada a diferença de densidade e umidade dos combustíveis. Esses fatores, em conjunto, comprovam a proximidade dos combustíveis quando utilizados para queima.

O teste realizado foi limitado a 50% de cada biomassa devido ao problema citado em relação ao sistema de alimentação, na formação de covis nas roscas dosadoras. Desta forma, por precaução extra e segurança operacional, visto que a parada da caldeira causa a parada da fábrica, não foi realizado o teste com maiores proporções de bambu. No entanto, os resultados apresentados neste trabalho indicam que é possível uma substituição integral do cavaco de eucalipto para o cavaco de bambu, caso não se tenha problemas nos sistemas de alimentação. Obviamente, só pode ser comprovado realizando um teste in loco e aumentando a proporção gradativamente, visto que cada caldeira possui particularidades. Além disso, visando sanar os problemas relacionados às impurezas, junto ao cavaco de bambu, pode-se adequar o padrão de cavaco enviado pelo fornecedor. O estudo foi feito realizando a mescla com o cavaco de eucalipto porque a caldeira já operava com esta biomassa. No entanto, nada impede que outros testes sejam realizados mesclando o bambu com outros tipos de biomassa.

Por fim, conclui-se que a substituição do eucalipto pela mistura de eucalipto e bambu foi positiva e apresenta muitas vantagens, principalmente sob o ponto de vista econômico e plantio próprio de florestas. O principal problema encontrado foi seu comportamento no sistema de alimentação, mas mudanças podem ser realizadas visando sanar estes obstáculos.

REFERÊNCIAS

- BAZZO, E., **Geração de vapor**. 2º Ed, Florianópolis. UFSC Revista e Ampliada, 1995. (Série didática).
- BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M.; SALGADO, A. L. B. **Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu**. IPEF, Piracicaba, n. 36, p. 13-17, 1987.
- COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. como carvão vegetal**. 2004. 74 p. Dissertação (Mestre em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DELGADO, P. S., **O bambu como material eco eficiente: caracterização e estudos exploratórios de aplicações**, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto 2011. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais.
- FILGUEIRAS, T.S.; SANTOS-GONÇALVES A.P. **Tupi guarani: fonte de informações sobre bambus nativos do Brasil**. *Heringeriana*, Brasília. v.1, n.1, p.35-41, 2007. **Checklist of the basal grasses and bamboos in Brazil**. *Bamboo Science and Culture; The Journal of the American Bamboo Society*. v.18(1): p.7-18, 2004.
- GUARNETTI, R. L., **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais** - São Paulo, 2013. Programa de Pós Graduação em Energia (Doutorado em Energia) Instituto de Energia e Ambiente. 156f. il
- INCROPERA, F. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6º Ed, LTC, 1998.
- MOREIRA, A. C. O. **Caracterização de *Bambusa vulgaris* Schrad. EX *J. C. WENDL. var. vulgaris* e dos resíduos de caldeira no processo de conversão térmica de energia**. 2012. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília. 2012.

OLIVEIRA, D. J., **Análise de Operação de Caldeiras de acordo com a NR-13.** Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Mecânica.

SANTOS, E.B.A. **Energy analysis of a mixed boiler using bamboo as fuel.** 2021. 58 p. Conclusion work project (Graduate in Mechanical Engineering) - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2021.

SCURLOCK, J. M. O.; DAYTON, D. C.; HAMES, B. **Bamboo: an overlooked biomass resource?** National Renewable Energy Laboratory. 2000. 34 p

SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., GORDON, J. VAN. W., **Fundamentos da Termodinâmica.** 5° Ed, Editora Edgard Blucher LTDA, 1997.

STROBEL, C., **Balanco Energético em Caldeiras, Máquinas Térmicas I.** Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica.

THE BABCOCK & WILCOX COMPANY. **Steam,** 2005. 1040 p. 41st. Edition

TRUONG, A. H.; LE, T. M. A. **Overview of bamboo biomass for energy production.** Hanoi: USTH, 2014. 25 p.

VARANDA, L. D.; CARASCHI, J. C.; ALMEIDA FILHO, F. **Potencial energético do carvão vegetal de bambu.** In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. Anais... Lavras: UFLA, 2010.

APÊNDICE A
Custos para implantação de Eucalipto

		1º Ciclo Eucalipto - 6 anos					
		Atividade	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Total/ha
Implantação		Pá carregadeira	Serviço	R\$/hr	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
		Roçada Mecanizada (total)	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Herbicida (total)	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 160,00	R\$ 160,00
			Herbicida pós	kg	3	R\$ 75,00	R\$ 225,00
			Inseticida	kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
			Serviço	R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00
		Subsolagem	Fertilizante base	R\$/ton	0,24	R\$ 7.720,00	R\$ 1.852,80
			Serviço	R\$/ha	1	R\$ 580,00	R\$ 580,00
		Plantio	Mudas	R\$/mlh	1,111	R\$ 600,00	R\$ 666,60
			MAP fertilizante	R\$/kg	0,1	R\$ 12,00	R\$ 1,20
			Cupinicida	R\$/kg	0,047	R\$ 690,00	R\$ 32,43
			Serviço	R\$/ha	1	R\$ 1.125,00	R\$ 1.125,00
		Irrigação	Serviço	R\$/ha	2	R\$ 600,00	R\$ 1.200,00
			Gel	R\$/kg	0,444	R\$ 35,00	R\$ 15,54
		Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
			Cupinicida	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
			Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
		Total					R\$ 7.093,57
Manutenção (1º ano)	Capina mecanizada	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 247,00	R\$ 247,00	
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00	
	Herbicida entrelinhas	Serviço	R\$/ha	2	R\$ 255,00	R\$ 510,00	
		Herbicida pós	L	4	R\$ 75,00	R\$ 300,00	
		Óleo	L	0,055	R\$ 60,00	R\$ 3,30	
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00	
		Fertilizante	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00	
	Total					R\$ 2.543,30	

Manutenção (2° ano)	2° adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizante	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Micro área	Boro	kg	4	R\$ 8,00	R\$ 32,00
		Zinco	kg	0,131	R\$ 38,00	R\$ 4,98
		Cobre	kg	0,105	R\$ 45,00	R\$ 4,73
		Óleo	kg	0,055	R\$ 70,00	R\$ 3,85
		Cloreto de potássio	kg	0,854	R\$ 10,00	R\$ 8,54
		Aplicação aérea	R\$/ha	1	R\$ 55,00	R\$ 55,00
	Herbicida entrelinhas	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 255,00	R\$ 255,00
		Herbicida pós	kg	2	R\$ 75,00	R\$ 150,00
Total					R\$ 1.920,09	
Manutenção (3°,4°,5° e 6° anos)	Inventário Florestal	Serviço	R\$/ha	4	R\$ 25,00	R\$ 100,00
	Herbicida (total)	Serviço	R\$/ha	4	R\$ 160,00	R\$ 640,00
		Herbicida pós	kg	8	R\$ 75,00	R\$ 600,00
		Inseticida	kg	0,4	R\$ 690,00	R\$ 276,00
Total					R\$ 1.616,00	
	Custo total (6 anos)					R\$ 13.172,96

APÊNDICE B
Custos para implantação de Bambu

		1º Ciclo Bambu - 3 anos				
		Atividade	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário
Implantação	Pá carregadeira	Serviço	R\$/hr	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
	Roçada Mecanizada (total)	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
	Herbicida (total)	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 160,00	R\$ 160,00
		Herbicida pós	kg	3	R\$ 75,00	R\$ 225,00
		Inseticida	kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
	Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00
	Subsolagem	Fertilizante e base	R\$/ton	0,24	R\$ 7.720,00	R\$ 1.852,80
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 348,00	R\$ 348,00
	Plantio	Mudas	R\$/mlh	560	R\$ 3,00	R\$ 1.680,00
		MAP fertilizante	R\$/kg	0,1	R\$ 12,00	R\$ 1,20
		Cupinicia	R\$/kg	0,047	R\$ 690,00	R\$ 32,43
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 359,00	R\$ 359,00

	Irrigação	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 360,00	R\$ 360,00
		Gel	R\$/kg	0,222	R\$ 35,00	R\$ 7,77
	Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Cupinici a	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	Total					R\$ 6.261,20
Manutenção (1º ano)	Capina mecanizada	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 148,00	R\$ 148,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	Herbicida entrelinhas	Serviço	R\$/ha	2	R\$ 255,00	R\$ 510,00
		Herbicida pós	L	4	R\$ 75,00	R\$ 300,00
		Óleo	L	0,055	R\$ 60,00	R\$ 3,30
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizant e	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Total					R\$ 2.444,30
Manutenção (2º ano)	2º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizant e	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00

	Herbicida entrelinhas	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 255,00	R\$ 255,00
		Herbicida pós	kg	2	R\$ 75,00	R\$ 150,00
	Total					R\$ 1.811,00
Manutenção (3º ano)	Herbicida entrelinhas	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 255,00	R\$ 255,00
		Herbicida pós	kg	2	R\$ 75,00	R\$ 150,00
	Total					R\$ 405,00
	Custo 1º ciclo (3 anos)					R\$ 10.922,7 0
Manutenção (2º ciclo - 3 anos)	2º Ciclo Bambu - 2 anos					
	Atividade	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Total/ha
	Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00
	Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Cupinicia a	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00

		Fertilizante	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Total					R\$ 2.147,00
Manutenção (3º ciclo - 2 anos)	3º Ciclo Bambu - 2 anos					
	Atividade	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Total/ha
	Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00
	Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Cupinicida	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizante	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Total					R\$ 2.147,00
Manutenção (4º ciclo - 2 anos)	4º Ciclo Bambu - 2 anos					
	Atividade	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Total/ha
	Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
Serviço		R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00	

	Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Cupinici a	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizant e	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Total					R\$ 2.147,00
Manutenção (5º ciclo - 2 anos)	5º Ciclo Bambu - 2 anos					
	Atividade	Descrição	Unidad e	Quantidad e	Preço unitário	Total/ha
	Calcário	Aplicação	ton	1	R\$ 230,00	R\$ 230,00
		Serviço	R\$/ha	1	R\$ 240,00	R\$ 240,00
	Herbicida pré	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 125,00	R\$ 125,00
		Cupinici a	R\$/kg	0,1	R\$ 690,00	R\$ 69,00
		Herbicida pré	R\$/kg	0,1	R\$ 770,00	R\$ 77,00
	1º adubação cobertura	Serviço	R\$/ha	1	R\$ 196,00	R\$ 196,00
		Fertilizant e	ton	0,22	R\$ 5.500,00	R\$ 1.210,00
	Total					R\$ 2.147,00

APÊNDICE C

Código EES para balanço energético do sistema

$$p_atm=98,067*0,93$$

"1 - Saída da Caldeira"

$$p_g[1]=13,664 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p[1]=98,067*p_g[1]+p_atm$$

$$T[1]=\text{temperature}(\text{Water};p=p[1];x=1)$$

$$h[1]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[1];x=1)$$

$$m_dot_h[1]=m_dot_h[2]$$

$$m_dot_h[1]=19700$$

$$m_dot[1]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s})*m_dot_h[1]$$

"2 - Linha de Vapor"

$$p_g[2]=12,664 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p[2]=98,067*p_g[2]+p_atm$$

$$T[2]=\text{temperature}(\text{Water};p=p[2];x=1)$$

$$h[2]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[2];x=1)$$

$$m_dot_h[2]=m_dot_h[3]+m_dot_h[5]$$

$$m_dot[2]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s})*m_dot_h[2]$$

"3 - Entrada do Processo"

$$p_g[3]=12,16 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p[3]=98,067*p_g[3]+p_{\text{atm}}$$

$$m_{\text{dot}}_h[3]=19700$$

$$m_{\text{dot}}[3]=\text{convert(kg/h;kg/s)}*m_{\text{dot}}_h[3]$$

$$T[3]=\text{temperature(Water;p=p[3];x=1)}$$

$$h[3]=\text{enthalpy(Water;p=p[3];x=1)}$$

"4 - Saída do Processo"

$$\text{Retorno}=0,6$$

$$T[4]=80$$

$$p_g[4]=10,16$$

$$p[4]=98,067*p_g[4]+p_{\text{atm}}$$

$$h[4]=\text{enthalpy(Water;p=p[4];T=T[4])}$$

$$m_{\text{dot}}_h[4]=m_{\text{dot}}_h[3]*\text{Retorno}$$

$$m_{\text{dot}}[4]=\text{convert(kg/h;kg/s)}*m_{\text{dot}}_h[4]$$

"5 - Entrada Desaerador"

$$p_g[5]=p_g[2]$$

$$p[5]=98,067*p_g[5]+p_{\text{atm}}$$

$$T[5]=T[2]$$

$$h[5]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[5];x=1)$$

$$m_dot_h[5]=(m_dot_h[7]*(h[7]-h[6])-m_dot_h[4]*(h[4]-h[6]))/(h[5]-h[6])$$

$$m_dot[5]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s})*m_dot_h[5]$$

"6 - Agua Makeup"

$$p_g[6]=4 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p[6]=98,067*p_g[6]+p_atm$$

$$T[6]=25$$

$$h[6]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[6];T=T[6])$$

$$m_dot_h[6]=m_dot_h[7]-m_dot_h[5]-m_dot_h[4]$$

$$m_dot[6]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s})*m_dot_h[6]$$

"7 - Entrada Bombas"

$$p[7]=p[6]$$

$$p[7]=98,067*p_g[7]+p_atm$$

$$h[7]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[7];T=T[7])$$

$$T[7]=\text{temperature}(\text{Water};p=p[7];s=s[7])$$

$$m_dot_h[7]=m_dot_h[8]$$

$$m_dot[7]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s})*m_dot_h[7]$$

"8 - Saída Bombas"

$$p_g[8]=17,743 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$p[8]=98,067 * p_g[8] + p_{\text{atm}}$$

$$T[8]=108,7$$

$$h[8]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[8];T=T[8])$$

$$m_{\text{dot}}_h[8]=m_{\text{dot}}_h[1]/(1-\text{Purga})$$

$$m_{\text{dot}}[8]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s}) * m_{\text{dot}}_h[8]$$

"9 - Saída Economizador"

$$p_g[9]=p_g[8]$$

$$p[9]=98,067 * p_g[9] + p_{\text{atm}}$$

$$T[9]=147,8$$

$$h[9]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[9];T=T[9])$$

$$m_{\text{dot}}_h[9]=m_{\text{dot}}_h[8]$$

$$m_{\text{dot}}[9]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s}) * m_{\text{dot}}_h[9]$$

"10 - Purga"

$$\text{Purga}=0,03$$

$$p_g[10]=p_g[1]$$

$$p[10]=98,067 * p_g[10] + p_{\text{atm}}$$

$$h[10]=\text{enthalpy}(\text{Water};p=p[10];x=0)$$

$$T[10]=\text{temperature}(\text{Water};p=p[10];x=0)$$

$$m_dot_h[10]=m_dot_h[9]-m_dot_h[1]$$

$$m_dot[10]=\text{convert}(\text{kg/h};\text{kg/s}) * m_dot_h[10]$$

"Balanço de Energia - Caldeira"

$$Q_dot_cald=m_dot[1]*(h[1]-h[9])+(h[10]-h[9])*(1/(1-\text{purga})-1)$$

$$Q_dot_cald_kcal=\text{convert}(\text{kJ/s};\text{kcal/h}) * Q_dot_cald$$

"PCS - Combustível"

$$\text{PCS_Fuel_kcal}=4560$$

$$\text{PCS_Fuel}=\text{convert}(\text{kcal/kg};\text{kJ/kg}) * \text{PCS_Fuel_kcal}$$

"Consumo - Combustível"

$$\text{Eff_Cald}=0,732$$

$$\text{densidade_fuel}=255$$

$$m_dot_fuel=Q_dot_cald/\text{PCS_Fuel}/\text{Eff_Cald}$$

$$m_dot_fuel_h=\text{convert}(\text{kg/s};\text{kg/h}) * m_dot_fuel$$

$$V_dot_fuel=m_dot_fuel/\text{densidade_fuel}$$

$$V_dot_fuel_h=\text{convert}(\text{m}^3/\text{s};\text{m}^3/\text{h}) * V_dot_fuel$$

Arrays Table

Main

Sort	$p_{g,i}$ [kgf/cm ²]	p_i [kPa]	T_i [C]	h_i [kJ/kg]	\dot{m}_i [kg/s]	$\dot{m}_{h,i}$ [kg/h]	s_i [kJ/kg-K]
[1]	13,66	1431	196,1	2790	5,472	19700	
[2]	12,66	1333	192,8	2788	5,472	19700	
[3]	12,16	1284	191,1	2787	4,993	17974	
[4]	10,16	1088	80	335,8	2,996	10784	
[5]	12,66	1333	192,8	2788	0,4795	1726	
[6]	4	483,5	25	105,2	2,166	7799	
[7]	4	483,5	108,6	455,7	5,641	20309	1,403
[8]	17,74	1831	108,7	457,1	5,641	20309	1,403
[9]	17,74	1831	147,8	623,7	5,641	20309	
[10]	13,66	1431	196,1	834,9	0,1692	609,3	

Figura 22: Resultado código EES