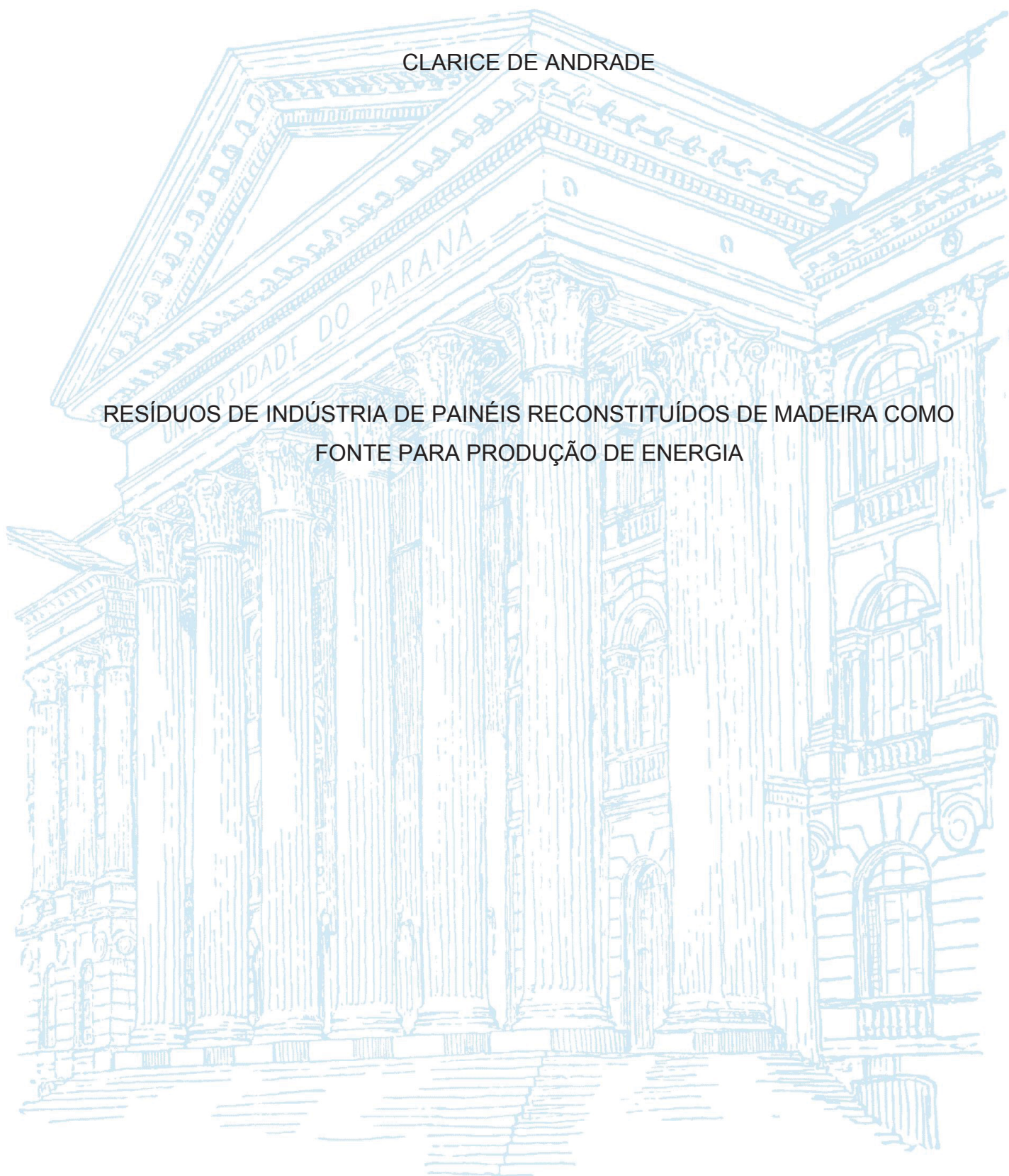


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLARICE DE ANDRADE

RESÍDUOS DE INDÚSTRIA DE PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DE MADEIRA COMO  
FONTE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA



CURITIBA

2019

CLARICE DE ANDRADE

RESÍDUOS DE INDÚSTRIA DE PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DE MADEIRA COMO  
FONTE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Tese apresentada ao curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal no Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva.  
Coorientadores: Dr. Fernando Augusto Ferraz,  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lucieli Rossi.

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR.

Andrade, Clarice de

Resíduos de Indústria de painéis reconstituídos de madeira como fonte para produção de energia / Clarice de Andrade. – Curitiba, 2019.  
117 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Dr. Fernando Augusto Ferraz

Profa. Dra. Lucieli Rossi

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 29/03/2019.

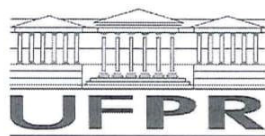
Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Resíduos vegetais. 2. Resíduos como combustível. 3. Painéis de madeira. 4. Biomassa. 5. Teses. I. Silva, Dimas Agostinho da. II. Ferraz, Fernando Augusto. III. Rossi, Lucieli. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.839.81

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9H160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CLARICE DE ANDRADE** intitulada: **Resíduos de indústrias de painéis reconstituídos de madeira como fonte para produção de energia**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Março de 2019.

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA  
Presidente da Banca Examinadora

FERNANDO AUGUSTO FERRAZ  
Avaliador Externo (UFPR)

CYMARÁ REGINA OSHIRO  
Avaliador Externo (Autônoma)

PEDRO HENRIQUE GONZALEZ DE CADEMARTORI  
Avaliador Interno (UFPR)

IVAN CRESPO SILVA  
Avaliador Externo (UFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida, saúde, minha família, proteção.

A minha família que sempre me apoiou.

A Universidade Federal do Paraná pela estrutura oferecida.

A Capes pelo apoio financeiro.

Ao Professor Dr. Dimas Agostinho da Silva pela orientação, paciência, compreensão, amizade e apoio em todos esses anos de convivência.

Ao Professor Dr. Ivan Crespo da Silva pelo auxílio, paciência, amizade e orientação no momento de “crise”.

A Professora Dra. Lucieli Rossi, pelo carinho, orientação, paciência, amizade em todos os momentos dessa fase.

Ao Dr. Fernando Augusto Ferraz, pela amizade, paciência, orientação no transcorrer deste trabalho.

A amiga de sempre Sandra Lúcia Soares Mayer, pelo apoio e incentivo.

Aos amigos recentes Vivian Midori Takahashi e Rudson Oliveira pelo apoio e incentivo.

Aos colegas Vitória Roberta Ferreira e Nelson Marinho pelo apoio e incentivo.

Aos colegas de corredor e de outros laboratórios pelo apoio e incentivo.

A secretaria da Pós-graduação do curso de Engenharia Florestal: David e Reinaldo pelo apoio.

Ao LAMIR – Laboratório de Análises Mineralógicas, por viabilizar análises dos materiais.

A Central Analítica da USP pelas análises realizadas.

Ao Laboratório de Cerâmica – Usina Piloto –UFPR na figura do amigo de sempre Walderson Klitzke pelo apoio e incentivo.

A empresa de painéis que propiciou a coleta do material estudado.

A todos os que direta ou indiretamente me auxiliaram na realização deste trabalho, muito obrigada.

## RESUMO

As florestas plantadas fornecem madeira para diversos setores e a indústria de painel é o quarto maior consumidor. A crescente competitividade do mercado, o crescimento da demanda energética, a busca por redução de custos e a preocupação crescente na preservação do meio ambiente, faz com que as empresas utilizem os resíduos gerados no seu processo produtivo como combustível buscando a sustentabilidade no processo industrial. O presente estudo teve por objetivo avaliar propriedades energéticas destes tipos de resíduos gerados numa indústria de painéis no Paraná sendo eles: casca, pó, fibra, partícula, cavaco, lodo e rejeitos do processo. Para esses resíduos de biomassas foram determinadas as propriedades físico-químicas e energéticas e calculadas as emissões de gases de efeito estufa. Os óxidos presentes nas cinzas das amostras foram caracterizados por espectroscopia de fluorescência de raios X. Foi possível verificar a tendência de formação de escórias e incrustações além da determinação da faixa de temperatura de fusão das cinzas. Além dos resíduos individualizados, foram analisadas composições entre os resíduos para avaliar a eficiência energética. Os resultados das avaliações mostrou que os resíduos gerados na indústria de painéis podem ser utilizados como fonte de energia; o aumento no consumo das biomassas dos grupos rejeito de processo, pó e fibra melhora a eficiência energética.

Palavras-chave: Biomassa. Resíduo. Energia. Espectroscopia de Fluorescência de Raios X. Temperatura de Fusão das Cinzas. Eficiência Energética.

## **ABSTRACT**

Planted forests provide wood for several sectors and the panel industry is the fourth largest consumer. The increasing competitiveness of the market, the growth of energy demand, the search for cost reduction and the growing concern for the preservation of the environment, means that companies use the waste generated in their production process as a fuel seeking sustainability in the industrial process. The purpose of this study was to evaluate the energetic properties of these types of residues generated in a panel industry in Paraná, such as: bark, powder, fiber, particle, chip, sludge and tailings. For these biomass residues the physicochemical and energy properties were determined and the greenhouse gas emissions calculated. The oxides present in the ashes of the samples were characterized by X-ray fluorescence spectroscopy. It was possible to verify the tendency of formation of slag and incrustations besides the determination of the melting temperature range of the ashes. In addition to the individualized residues, compositions were analyzed among the residues to evaluate energy efficiency. The results of the evaluations showed that the waste generated in the panel industry can be used as an energy source; the increase in biomass consumption of the process waste, powder and fiber groups improves energy efficiency.

**Keywords:** Biomass. Residue. Energy. X-Ray Fluorescence Spectroscopy. Ash Melting Temperature. Energy Efficiency.

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BaO	Óxido de Bário
Br	Bromo
C	Carbono
CaO	Óxido de Cálcio
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CE	Camada externa
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CI	Camada interna
Cl	Cloro
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Cromo III
CuO	Óxido de Cobre
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro III
H	Hidrogênio
Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de mercúrio
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
MnO	Óxido de Manganês
MoO <sub>3</sub>	Trióxido de Molibdênio
N	Nitrogênio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira
NiO	Óxido de Níquel
O	Oxigênio



P.F.	Perda ao fogo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Fósforo
PbO	Óxido de Chumbo
PVC	Poli(cloreto de vinila)
Rb <sub>2</sub> O	Óxido de Rubídio
S	Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
SO <sub>3</sub>	Óxido Sulfúrico
SrO	Óxido de Estrôncio
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
ZnO	Óxido de Zinco
ZrO <sub>2</sub>	Dióxido de Zircônio

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS ÍNDICES DE PROPENSÃO À FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO E ÁLCALIS.....	45
TABELA 2 -	VALORES MÉDIOS DETERMINADOS NA ANÁLISE ELEMENTAR DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	73
TABELA 3 -	VALORES MÉDIOS ESTIMADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS.....	74
TABELA 4 -	ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PELAS BIOMASSAS RESIDUAIS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS NO PARANÁ.....	79
TABELA 5 -	ANÁLISE QUÍMICA DE CINZAS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X NAS BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	81
TABELA 6 -	ESTIMATIVA DOS PERCENTUAIS DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS PRESENTES NOS GRUPOS DE BIOMASSA FORMADOS.....	83
TABELA 7 -	ÍNDICE DE FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, ÁLCALI E SINTERIZAÇÃO NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	84
TABELA 8 -	VALORES MÉDIOS ESTIMADOS PARA A TENDÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, ÁLCALI E SINTERIZAÇÃO NOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS.....	86
TABELA 9 -	QUANTIDADE ESTIMADA DE ENERGIA GERADA DE CADA BIOMASSA NO PERÍODO DE UM ANO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	93

TABELA 10 - QUANTIDADE ESTIMADA DE ENERGIA GERADA NOS GRUPOS NO PERÍODO DE UM ANO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	92
TABELA 11 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CASCA/CAVACO.....	94
TABELA 12 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO PÓ/CAVACO.....	96
TABELA 13 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO PARTÍCULA/CAVACO.....	98
TABELA 14 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FIBRA/CAVACO.....	100
TABELA 15 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO LODO/CAVACO.....	102
TABELA 16 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO REJEITO DE PROCESSO/CAVACO.....	104

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	EXEMPLOS DE PAINÉIS FABRICADOS A PARTIR DE PARTÍCULAS E DE FIBRAS DE MADEIRA .....	28
FIGURA 2 -	BIOMASSAS RESIDUAIS GERADAS NO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS MDP E MDF .....	35
FIGURA 3 -	BIOMASSAS RESIDUAIS NA ETAPA DO PRÉ PROCESSO .....	36
FIGURA 4 -	BIOMASSAS RESIDUAIS NA ETAPA DO PROCESSO MDP .....	37
FIGURA 5 -	BIOMASSA RESIDUAL DA ETAPA DO PROCESSO MDF .....	38
FIGURA 6 -	BIOMASSAS RESIDUAIS DA ETAPA PÓS PROCESSOS .....	39
FIGURA 7 -	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO APARATO PARA DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE APARENTE .....	41
FIGURA 8 -	AREAS DE PREDOMINÂNCIA DOS ÓXIDOS NO GRÁFICO TERNÁRIO .....	45
FIGURA 9 -	TEMPERATURA DE FUSÃO DAS CINZAS NA DEFORMAÇÃO INICIAL PARA 55 VARIEDADES DE BIOMASSA NO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DE CINZA DE BIOMASSA, % EM MASSA .....	46
FIGURA 10 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA GRUPO DE BIOMASSA NO CONSUMO ANUAL .....	49
FIGURA 11 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO CASCA .....	50
FIGURA 12 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO PÓ .....	50
FIGURA 13 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO CAVACO .....	51
FIGURA 14 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO PARTÍCULA .....	51
FIGURA 15 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO FIBRA .....	52
FIGURA 16 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO LODO .....	52
FIGURA 17 -	PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL DO GRUPO REJEITO DO PROCESSO .....	53

FIGURA 18 -	VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ-PROCESSO .....	54
FIGURA 19 -	VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP ....	55
FIGURA 20 -	VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF .....	56
FIGURA 21 -	VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS-PROCESSO.....	57
FIGURA 22 -	TEORES DE UMIDADE EM BASE ÚMIDA ESTIMADOS DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS .....	58
FIGURA 23 -	VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO .....	59
FIGURA 24 -	VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP .....	60
FIGURA 25 -	VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF .....	61
FIGURA 26 -	VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS PROCESSO .....	62
FIGURA 27 -	MÉDIA ESTIMADA DA DENSIDADE APARENTE A GRANEL DAS AMOSTRAS DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS .....	63
FIGURA 28 -	VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS - PRÉ PROCESSO .....	64
FIGURA 29 -	VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS - PROCESSO MDP.....	65
FIGURA 30 -	VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS – PROCESSO MDF .....	66

FIGURA 31 -	VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS – PÓS PROCESSO .....	67
FIGURA 32 -	TEORES MÉDIOS ESTIMADOS DE MATERIAIS VOLÁTEIS, CARBONO FIXO E CINZAS PARA OS GRUPOS DE BIOMASSAS RESIDUAIS FORMADOS .....	68
FIGURA 33 -	VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO .....	69
FIGURA 34 -	VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP .....	70
FIGURA 35 -	VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF .....	70
FIGURA 36 -	VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS PROCESSO .....	71
FIGURA 37 -	VALOR MÉDIO ESTIMADO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL .....	72
FIGURA 38 -	DIAGRAMA VAN KREVELEN .....	75
FIGURA 39 -	RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO .....	76
FIGURA 40 -	RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PROCESSO MDP.....	77
FIGURA 41 -	RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PROCESSO MDF.....	77
FIGURA 42 -	RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PÓS PROCESSO .....	78
FIGURA 43 -	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PRÉ-PROCESSO .....	86

FIGURA 44 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PROCESSO MDP .....	87
FIGURA 45 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PROCESSO MDF .....	88
FIGURA 46 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PÓS-PROCESSO .....	89
FIGURA 47 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS NOS GRUPOS FORMADOS .....	90
FIGURA 48 - PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA NO CONSUMO ANUAL DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS .....	93
FIGURA 49 -DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – CASCA E CAVACO.....	95
FIGURA 50- DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – PÓ E CAVACO .....	97
FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – PARTÍCULA E CAVACO.....	99
FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – FIBRAS E CAVACO.....	101
FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – LODO E CAVACO.....	103
FIGURA 54 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – REJEITOS DO PROCESSO E CAVACO .....	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>24</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	25
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>26</b>
2.1	INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	26
2.2	TIPOS DE PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA.....	26
2.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE MADEIRA MDF E MDP.....	29
2.4	MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS.....	31
2.5	RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS.....	32
2.6	USO DA ENERGIA NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS.....	32
2.7	IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA UTILIZADA NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1	TEOR DE UMIDADE.....	40
3.2	DENSIDADE APARENTE.....	40
3.3	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA .....	41
3.4	PODER CALORÍFICO.....	41
3.5	COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR.....	42
3.6	ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	43
3.7	ESCÓRIA, INCRUSTAÇÕES, FORMAÇÃO DE ÁLCALIS E SINTERIZAÇÃO.....	43
3.8	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	46
3.9	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	47
3.10	COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA.....	47
3.11	ESTATÍSTICA.....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1	PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL.....	50
4.2	PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS BIOMASSAS RESIDUAIS...	53
4.2.1	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ENERGÉTICA.....	53
4.2.1.1	Teor de umidade.....	53
4.2.1.2	Densidade aparente.....	58



4.2.1.3	Teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas .....	63
4.2.1.4	Poder calorífico.....	69
4.2.1.5	Composição química elementar.....	72
4.3	EMISSÕES DE GASES.....	78
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS.....	80
4.4.1	Espectroscopia por fluorescência de raios X.....	80
4.4.2	Propensão à formação de escória, incrustação, álcali e sinterização.....	83
4.4.3	Classificação das cinzas em função do óxido predominante.....	86
4.5	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA DA BIOMASSA.....	91
4.6	IMPLICAÇÕES DE ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DE BIOMASSA PARA MELHORIA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	92
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira sempre desempenhou a função de fonte de energia além de outras utilizações. A partir da revolução industrial, os combustíveis fósseis foram substituindo gradativamente a madeira e mesmo com essa permuta continua sendo muito empregada, inclusive no Brasil. Quanto mais desenvolvido industrialmente o país maior é a necessidade de energia, em decorrência do maior uso de tecnologia e maior infraestrutura. Em relação a escolha da fonte de energia a ser empregada, esta depende do fator econômico e da disponibilidade do combustível.

Na matriz energética brasileira as fontes de energia renováveis correspondem a 43%, sendo a lenha responsável por 8% desse total (EPE, 2017). Para suprir a demanda de energia por lenha houve um aumento de plantios florestais para a produção de biomassa. Dentre os diversos consumidores de madeira oriunda de florestas plantadas, o setor de produção de painéis de madeira, foi o quinto maior consumidor, de acordo com o Relatório Anual emitido pelo IBÁ em 2017.

Segundo IBÁ (2017), o segmento brasileiro de produção de painéis de madeira ocupou o 8º lugar no ranking dos maiores produtores mundiais. No Brasil existem 18 unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída, sendo que a maior parte está localizada nas regiões Sul e Sudeste.

Diante da crescente competitividade do mercado, do crescimento da demanda energética, da busca por redução de custos e da preocupação crescente com o meio ambiente, as empresas utilizam cada vez mais como combustível os resíduos gerados no seu processo produtivo, minimizando a dependência da energia fornecida pelo sistema nacional e buscando a sustentabilidade no processo industrial.

Durante o processo produtivo ocorrem as perdas e a produção de resíduos, que precisam ter destinação adequada. De acordo com Guerra *et al.* (2015), a biomassa é apontada como uma fonte de energia renovável com o aproveitamento de resíduos de outros processos de transformação. Nas indústrias de base florestal é possível utilizar os resíduos gerados no processo produtivo como matéria-prima para conversão de energia química em energia térmica, sendo um dos processos mais utilizados o processo de combustão. O conceito de economia circular onde nada é desperdiçado e os recursos naturais são gerenciados de forma sustentável e a biodiversidade é protegida (OLABI, 2019) pode ser aplicado. Além da geração de

energia para o processo produtivo, em algumas situações, algumas empresas no Brasil ainda vendem a energia excedente para a distribuidora de energia elétrica.

Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivo avaliar as propriedades energéticas dos resíduos gerados e utilizados como fonte de energia em uma indústria de painéis no Paraná.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar as propriedades e eficiência energética dos resíduos gerados em uma indústria de painéis de madeira utilizados como fonte de energia e simular cenários em diferentes propostas de composições.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar propriedades físico-químicas e energéticas
- Calcular a emissão de gases de efeito estufa
- Propor e avaliar as modificações nas propriedades físico-químicas, energéticas em função das composições propostas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 INDÚSTRIA DE PAINÉIS

A indústria de painéis surgiu em função da necessidade de suprir o mercado com produtos substitutos da madeira maciça, cada vez mais escassa e com valores crescentes no mercado (MATTOS *et al.*, 2008). Pertence ao segmento de processamento secundário na classificação de indústrias de processamento da madeira segundo a ABRAF (2013). Nesse segmento, as indústrias beneficiam a madeira e transformam o produto primário em produtos intermediários que serão utilizados em produtos finais.

As indústrias de painéis de madeira têm como característica a formação de, praticamente um oligopólio, com poucas unidades. Por requererem matéria prima semelhante à da celulose, têm reflorestamentos próprios e alta capacidade econômica e financeira (CARVALHO *et al.*, 2005). A maioria das empresas produtoras de painéis de madeira reconstituída produz pelo menos dois tipos de painéis, sendo essa prática comum no mercado em função de ganhos de escala na produção e na comercialização da produção. A conciliação da fabricação de painéis utilizando partículas como o *Medium Density Particleboard* (MDP) e fibras como o *Medium Density Fiberboard* (MDF) em uma mesma planta, otimiza a produção em decorrência de complementaridade nos processos de fabricação (MATTOS *et al.*, 2008).

### 2.2 TIPOS DE PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA

Os painéis de madeira podem ser classificados em dois grupos: os formados por partículas e os formados por fibras (IWAKIRI, 2005; SILVA, 2012; BATISTA, 2014; PIEKARSKI *et al.*, 2014; VIDAL; HORA, 2014), ambos destinados à fabricação de móveis, utilizados na construção civil e na confecção de outros produtos. Estes autores expressão os seguintes conceitos referentes a painéis de madeira:

- Os painéis formados por partículas são o MDP (*Medium Density Particleboard*) que é um painel constituído de partículas de madeira aglutinadas entre si, mediante ação de temperatura e alta pressão; e o OSB (*Oriented Strand Board*) que é um painel onde tiras ou lascas de madeira são orientadas perpendicularmente em diversas camadas.

- Os painéis formados por fibras são as chapas de fibras (*Hardboard*) que são chapas de espessura fina com prensagem a quente, sem adição de resinas, que por meio de processo úmido reativa os aglutinantes naturais da própria madeira. O produto final apresenta alta densidade sendo empregado comumente em fundo de gavetas.
- A chapa de fibra isolante (*Insulation board*) possui baixa densidade, produzido a partir de fibras de madeira por meio de processo úmido, sendo empregadas como isolamento térmico e acústico, como divisórias e forros. O painel MDF (*Medium Density Fiberboard*) é um painel de madeira reconstituída, produzido por meio da aglutinação de fibras de madeira com resinas.
- Os painéis HDF (*High Density Fiberboard*) e SDF (*Super Density Fiberboard*) são painéis de fibras, que apresentam maior densidade, menor espessura e possuem outras aplicações de usos que o MDF, como pisos por exemplo.
- 

A FIGURA 1 apresenta exemplos desses painéis.

FIGURA 1 - EXEMPLOS DE PAINÉIS FABRICADOS A PARTIR DE PARTÍCULAS E DE FIBRAS DE MADEIRA



Fonte: Imagens livres em: <http://construindodecor.com.br/moveis-em-mdp-conheca-suas-caracteristicas> (A); <https://pt.depositphotos.com/40870715/stock-photo-osb-panel.html> (B); <http://premierforest.co.uk/products/standard-eucalyptus-oil-tempered-hardboard/> (C); <https://www.insulationsuperstore.co.uk/product/pavatherm-combi-woodfibre-insulation-board-80mm-by-pavatex-099m2.html> (D); <http://g2acusticaetermica.com.br/painel-mdf/> (E); <https://kz.all.biz/img/kz/catalog/898225.png> (F).

## 2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS PAINÉIS DE MADEIRA MDF E MDP

No processo MDP as toras são transformadas em partículas de tamanhos diferentes, por um cepilhador e são encaminhadas para um secador para reduzir o teor de umidade. As partículas são separadas pela granulometria onde, as partículas maiores são utilizadas na camada interna (CI) e as partículas menores são utilizadas na camada externa (CE). Essas partículas recebem resina e formam o painel sendo primeiro uma camada externa, sobre esta vai a camada interna e depois sobre estas duas mais uma camada externa, sendo destinado para prensa a quente. O painel formado é seccionado, recebe lixamento e é armazenado até a sua expedição.

No processo MDF as toras são picadas, os cavacos são classificados e lavados. Depois os cavacos são desfibrados, recebem resina, são previamente secos e as fibras são classificadas. Há a formação do colchão e uma pré-prensagem para melhor acomodação das fibras que passa por uma prensa contínua. Após esse processo os painéis já formados passam pela serra para dimensionamento dos painéis. Permanecem resfriando para obtenção de estabilidade, são posteriormente lixados e recebem o acabamento sendo armazenados para destinação final (IWAKIRI, 2005; SILVA, 2012; BATISTA, 2014; PIEKARSKI *et al.*, 2014).

## 2.4 MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS

De acordo com Rivela *et al.* (2006), Wilson (2010), nos Estados Unidos e na Europa, as fibras de madeira que irão produzir os painéis são processadas a partir de resíduos industriais de madeira tais como aparas, serragem, compensado e cavacos que podem ser de toras de baixo valor ou resíduos de madeira urbanos. No Brasil, as matérias-primas utilizadas na produção de painéis originam-se de florestas plantadas, majoritariamente as espécies *Pinus sp* e *Eucalyptus sp*, isso porque as empresas florestais procuram a combinação entre a uniformidade da matéria-prima com a melhoria da qualidade do produto final, além de buscar novas fontes de abastecimento em função da pressão exercida sobre exploração das florestas nativas (REIS *et al.*, 2012).

Segundo a ABRAF (2013), o consumo de madeira plantada para produção de painéis de madeira correspondeu a 7,1% da produção nacional, sendo 43% de madeira de eucalipto, 56% de madeira de pinus e 1% de outras espécies.

## 2.5 RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS

Para produzir os painéis de madeira reconstituída, a indústria gera resíduos que precisam ter uma destinação adequada e geralmente a finalidade é a queima para geração de energia térmica. Granada *et al.* (2002) afirmam que de 20 a 30% de toda matéria-prima utilizada na indústria de primeira e segunda transformação são convertidos em resíduos e Protásio *et al.* (2011) afirmam que há necessidade de estudos para um melhor aproveitamento desse material que poderiam ser prejudiciais ao meio ambiente, resultando em assoreamento e poluição de cursos de água ou ocupando grandes áreas na indústria.

São biomassas residuais utilizadas para energia: as cascas das toras, que podem corresponder de 10 a 15% do total de toras que participam do processo (Iwakiri, 2005), os cavacos desclassificados, os nós da madeira de pinus, partículas fora de padrões estabelecidos para formação do painel MDP, as fibras desclassificadas nas diversas etapas de fabricação do painel MDF, o pó de lixadeira de ambos os processos, algumas placas de painel MDF com defeito e aparas dos cortes dos painéis. Também são utilizados para geração de energia os lodos gerados em função da produção dos painéis e os rejeitos do precipitador eletrostático.

## 2.6 USO DA ENERGIA NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

Em países desenvolvidos, a produção de madeira destinada a energia só é relevante naqueles em que existe uma forte presença na economia de produtos de origem madeireira (em especial, pelo uso do licor negro na indústria de celulose e pelo uso de *pellets* de madeira, como resíduos da produção industrial). Os mais importantes são os Estados Unidos, o Canadá, a Suécia e a Finlândia (VIDAL; HORA, 2014).

Ainda de acordo com Vidal e Hora (2014) nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a maior fonte de biomassa de madeira para energia é proveniente de resíduos industriais, com 67,4% do total, seguido dos resíduos florestais, com 29,4%. Os resíduos pós-consumo representam somente 3,2% do total. Os resíduos florestais são a maior oportunidade como insumo de biomassa de madeira no mundo, em virtude de sua disponibilidade, relativo baixo custo e a proximidade de unidades produtivas de suas florestas plantadas. Já a oferta



oriunda de plantações de finalidade exclusivamente energética ainda é incipiente e está restrita a alguns países, mas tem grande potencial de desenvolvimento no longo prazo, em especial no Brasil.

A oferta de resíduos de madeira é pequena quando comparado aos resíduos do ciclo de vida da cana-de-açúcar, que também pode ser aproveitado na fabricação de pellets e na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração. Além da atividade sucroalcooleira, as demais atividades agrícolas também representam importante fonte potencial de resíduos (VIDAL; HORA, 2011). Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência inferior à de outras fontes, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por meio da combustão em fornos e caldeiras, por exemplo (CCEE, 2018).

De uma maneira geral, as indústrias de painéis de madeira utilizam como fonte de energia o gás natural, biomassa ou diesel para a produção de vapor a ser aplicado no processo produtivo dos painéis (GONZÁLEZ-GARCIA *et al.*, 2011). Na Europa, Ásia e Estados Unidos os equipamentos eram projetados para a queima de carvão mineral e foram adaptados para a utilização de biomassa e outros combustíveis. A tecnologia de queima determina o tipo de resíduo de biomassa a ser utilizado, ou mistura de combustíveis, eleitos em função do custo tanto do investimento no equipamento quanto no custo desse combustível (WOLF, 2013). Nas caldeiras das indústrias no Brasil, o combustível geralmente é o cavaco de madeira e as cascas da madeira utilizada no processo.

A utilização de resíduos da madeira é uma maneira relevante e importante de aliviar a pressão sobre o suprimento de madeira da floresta e atender à crescente demanda (VIS *et al.*, 2016). No entanto existem alguns problemas relacionados à utilização de resíduos industriais e florestais para produção de energia como a baixa densidade energética, as dimensões e volumes variados, a alta higroscopicidade e teor de umidade (SANTOS *et al.*, 2013). Biomassas com composição química e aspecto físico semelhantes podem comportar-se distintamente e gerar produtos sólidos diferentes durante sua utilização devido a diferentes modos de ocorrência dos elementos neles encontrados (VASSILEV *et al.*, 2012).

## 2.7 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA UTILIZADA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Os processos de conversão termoquímica de biomassa permitem a produção de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos, que podem substituir os combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. As biomassas podem ser originárias de resíduos de processamento industrial, esgotos domésticos, resíduos agrícolas, resíduos do processamento agrícola e culturas dedicadas para bioenergia. Grande parte das caldeiras utilizadas na Europa e Ásia tem como combustível o carvão mineral e para poder utilizar a biomassa vegetal são necessários investimentos com altos custos para as adaptações dos processos de conversão, mas mesmo assim a biomassa residual utilizada como combustível é considerada uma fonte barata de energia (SAIDUR *et al.*, 2011). Assim, a biomassa é hoje predominantemente usada para combustão direta, sendo a biomassa sólida agrícola matéria-prima crescente para produção de energia em toda a Europa (CHINNICI, 2015; GIRONÈS, 2017; BILANDJIZA, 2018).

No Brasil, várias biomassas estão sendo pesquisadas e utilizadas para produção de energia como por exemplo a casca de café, o bagaço de cana-de-açúcar, a palha de arroz, os resíduos da colheita de milho, o capim elefante, entre outras (PROTÁSIO *et al.*, 2011; QUENÓ, 2011).

Estudos realizados no Brasil demonstram que os principais parâmetros a serem avaliados para qualificar a utilização da biomassa com finalidade energética são o teor de umidade, a densidade, o teor de cinzas e o poder calorífico superior, podendo também incluir os componentes elementares (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre) (BRAND *et al.*, 2010; FURTADO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SCHIRMER *et al.*, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2018; DELUCIS, 2018; TONINI *et al.*, 2018).

Na Europa, além dos parâmetros citados anteriormente, estão sendo incluídos os óxidos presentes nas cinzas para qualificar a biomassa, pois compostos de cloreto e potássio (sais) podem causar altos níveis de corrosão em caldeiras (MCKENDRY, 2002; WOLF, 2013; FOURNEL *et al.*, 2015; FERNANDEZ *et al.*, 2016; NUNES *et al.*, 2017).

No estudo de Rushdi *et al.* (2004) verificaram que a deposição de cinzas e formação das escórias sobre o trocador de calor se inicia com a adesão de partículas

em estado seco, semiderretido ou derretido, dependendo da composição e tamanho das partículas de cinzas, do fluxo de calor no local e da condensação dos constituintes voláteis, assim como irregularidades na superfície podem auxiliar na deposição de pequenas partículas sobre ela.

Escória é definida como os depósitos fundidos ou sinterizados sobre superfícies de transferência de calor no interior da caldeira, predominando a troca de calor por radiação. A natureza, grau e composição destes depósitos variam ao longo da fornalha em função da temperatura de superfície, temperatura da chama, taxas de absorção, direção do escoamento dos gases e composição do combustível (BRYERS, 1996).

Incrustação é a deposição de cinzas onde a troca de calor é convectiva e não radiante, e os gases passantes apresentam em geral temperaturas abaixo do ponto de fusão das cinzas. São de constituição mais frágil que os depósitos formados por escória (BRYERS, 1996).

Os parâmetros a serem avaliados são importantes pois influenciam na eficiência energética da biomassa no processo de combustão. A combustão é um processo químico pelo qual um material reage com o oxigênio do ar produzindo luz e calor. Quando se utiliza a biomassa, essa combustão apresenta três etapas distintas: ignição, combustão dos materiais voláteis na forma de chama e combustão do carbono fixo com ausência de chama (ARBEX *et al.*, 2004).

O teor de umidade é um fator de grande importância no uso da biomassa como combustível, pois apresenta uma relação inversa com o poder calorífico; prejudica o armazenamento, uma vez que pode ocasionar a proliferação de fungos e a degradação do material; além de elevar os custos de transporte (VALE *et al.*, 2011). Lundgren *et al.* (2004) e Palacka (2017) verificaram em seus respectivos estudos que quanto maior o teor de umidade maior foi a emissão de CO durante o processo de combustão.

A densidade representa a relação da massa com o respectivo volume de madeira e geralmente madeiras de densidade maior apresentam alto valor energético. Esta é uma importante característica da biomassa pois está relacionada aos custos de transporte e armazenamento, além do comportamento da biomassa durante o processamento termoquímico e biológico quando utilizada como combustível. (McKENDRY, 2002; SILVA, 2014).

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que são desprendidas da madeira como gases durante a queima. O carbono fixo pode ser também chamado de coque, sendo a porção restante após a retirada dos materiais voláteis e cinzas. As cinzas são resíduos minerais oriundos da combustão completa do combustível (McKENDRY, 2002).

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de combustível. Pode ser expressa em kcal kg<sup>-1</sup> para combustíveis sólidos (SCREMIN, 2012).

Vassilev *et al.* (2012) estudaram 93 tipos diferentes de biomassas e verificaram que a maioria delas apresentaram ponto de fusão nas cinzas na faixa de 1100 a 1300 °C, e que a presença de Si é importante para a fusão de cinzas, viscosidade e atividade de fusão; e formação dominante de silicatos ou óxidos.

A eficiência da combustão e a capacidade de explorar a energia dependem do tipo de biomassa, método de combustão, escala e aplicação (WOLF, 2013). Para obtenção de eficiência energética busca-se gerar a mesma quantidade de energia com menor utilização de recursos naturais ou realização de um mesmo serviço com menor consumo de energia (EPE, 2018).

A avaliação da biomassa disponível estabelece as condições básicas iniciais para estimar a energia potencial possibilitada por ela. Com essas informações é possível uma avaliação da viabilidade técnico-econômica do uso da biomassa remanescente disponível como fonte de energia alternativa.

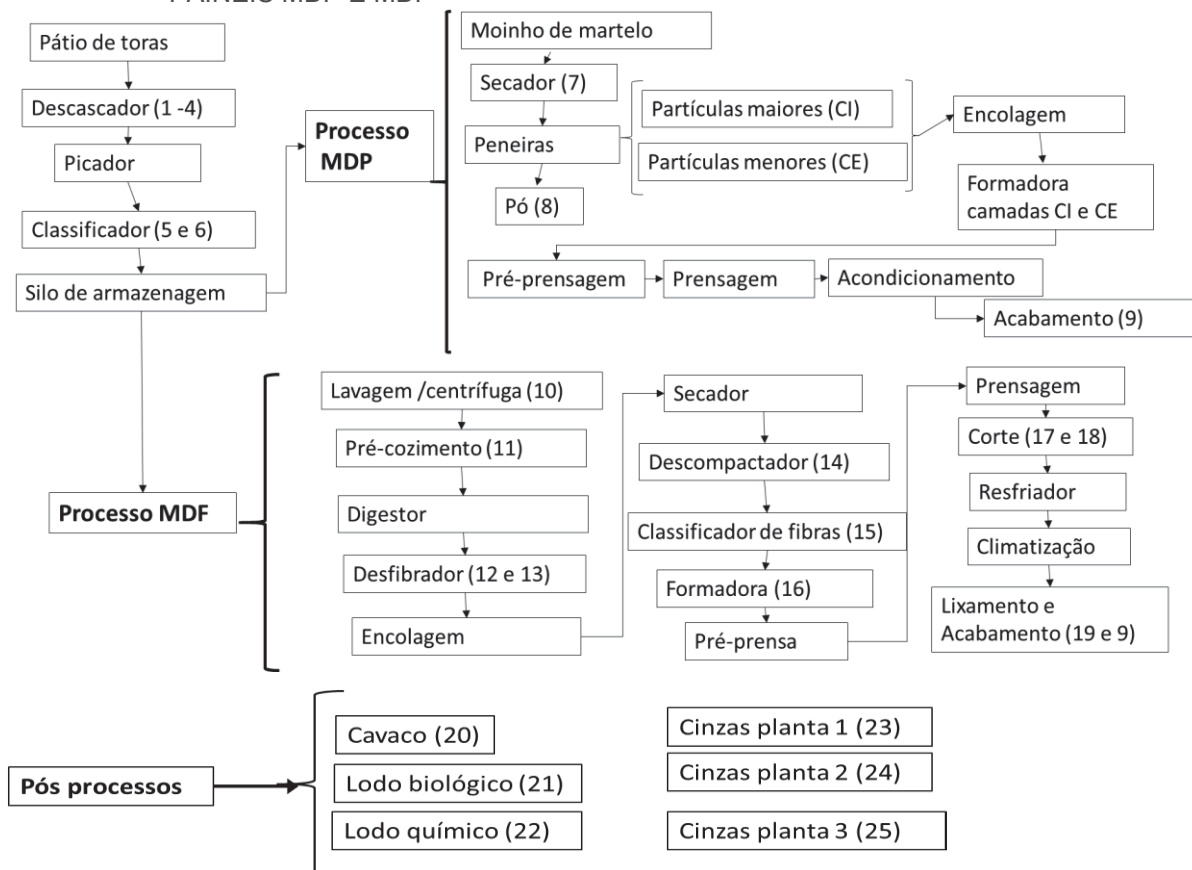
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram obtidos em uma indústria de painéis no estado no Paraná. Foram coletadas 22 biomassas residuais e 3 cinzas por mês durante um ano. Essas biomassas residuais foram: casca sem mistura, casca silo biomassa, casca moinho a martelo, casca de varredura, finos do crivo, *over* do crivo, saída do secador, pó de camada interna e camada externa (CICE), pó de lixadeira, finos úmido, serragem da centrífuga, *sifter*, rejeito desfibrador 1, rejeito desfibrador 2, rejeito do precipitador, fibra rejeitada, *trimming*, placa picada, rejeito emg, cavaco, lodo biológico e lodo químico.

Para facilitar o entendimento dos resultados em função da origem dos materiais estudados, estes foram separados em 4 etapas: pré-processos, processo MDF, processo MDP e pós-processos.

A FIGURA 2 apresenta o processo produtivo dos painéis e as biomassas residuais geradas.

FIGURA 2 - BIOMASSAS RESIDUAIS GERADAS NO PROCESSO PRODUTIVO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS MDP E MDF



Fonte: A autora (2019).

Em cada etapa do processo produtivo foram elencadas as biomassas residuais geradas conforme demonstrado nas FIGURAS 3 A 6.

FIGURA 3 – BIOMASSAS RESIDUAIS NA ETAPA DO PRÉ PROCESSO

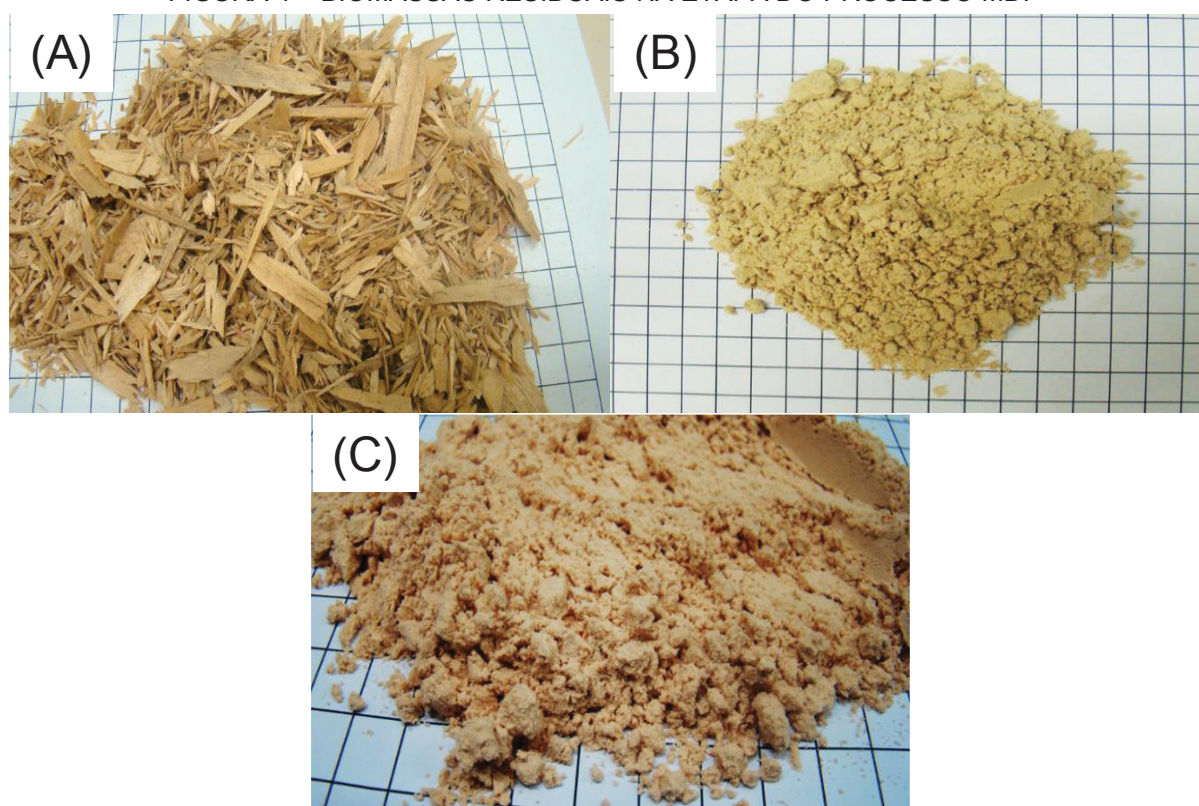


Fonte: A autora (2019).

A FIGURA 3(A) mostra a casca sem mistura (1) que é originária dos descascadores de toras e ficam armazenadas no pátio. A FIGURA 3 (B) trata-se de cascas do silo de biomassa (2), onde parte das cascas geradas nos descascadores são direcionadas diretamente para o silo de armazenamento. A FIGURA 3 (C) apresenta a casca moinho a martelo(3), que recebeu esse nome porque são cascas que são transportadas por esteiras e ficam acumuladas próximas ao moinho de

martelo. A FIGURA 3 (D) trata-se de casca de varredura (4), que são as cascas que ficam na carroceria do caminhão de transporte das toras e que ao finalizar o descarregamento são varridas e acumuladas no pátio. A FIGURA 3 (E) trata-se de finos do crivo (5) onde após a transformação das toras em cavacos, estes são classificados e o que estiver abaixo do especificado no processo são destinados a ficar no pátio. Já a FIGURA 3 (F) apresenta *over* do crivo (6), que é o material que ficou acima do especificado após a transformação das toras em cavacos.

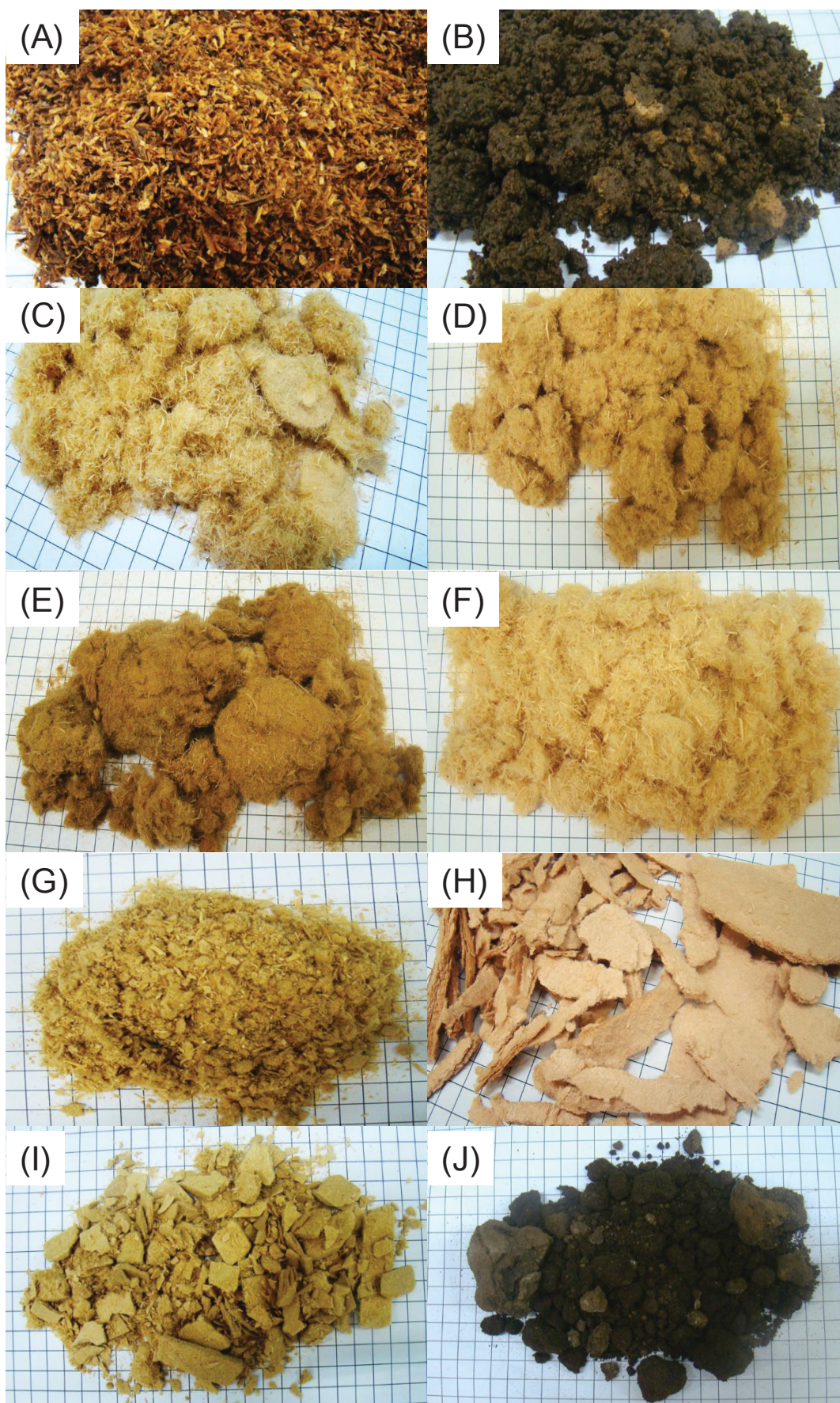
FIGURA 4 – BIOMASSAS RESIDUAIS NA ETAPA DO PROCESSO MDP



Fonte: A autora (2019).

A FIGURA 4 (A) mostra a biomassa residual saída do secador (7), que são partículas secas e desclassificadas da transformação dos cavacos em partículas, e que ficam acondicionadas em silo próprio. A FIGURA 4 (B) trata-se de pó de CICE (8), originário da classificação das partículas secas que serão utilizadas no processo produtivo do painel MDP. A FIGURA 4 (C) trata-se de pó de lixadeira (9), originário do lixamento para acabamento dos painéis formados.

FIGURA 5 – BIOMASSA RESIDUAL DA ETAPA DO PROCESSO MDF

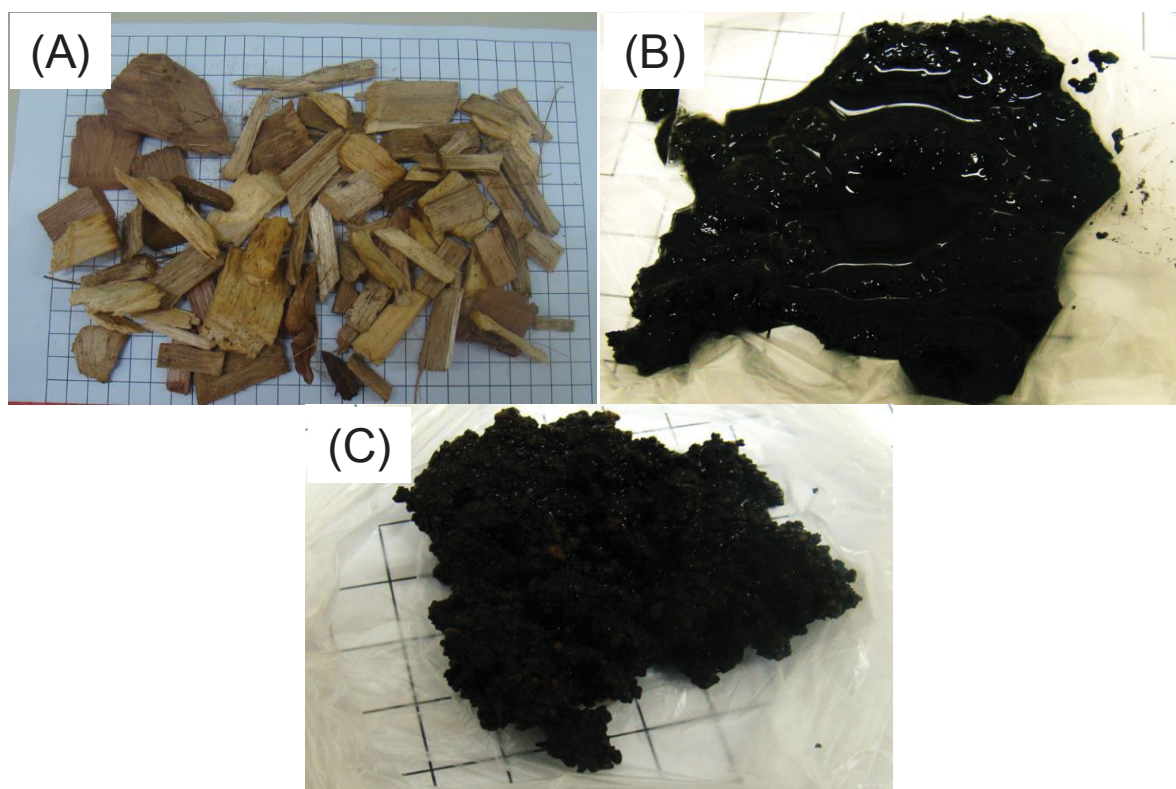


Fonte: A autora (2019)



A FIGURA 5 (A) mostra a biomassa residual finos úmido (10), que são originários da lavagem dos cavacos a serem utilizados no processo produtivo do painel MDF, sendo armazenado no pátio a céu aberto. A FIGURA 5 (B) trata-se da biomassa serragem da centrífuga (11), que são fibras fora do padrão de classificação após a obtenção destas pelo digestor de cavacos. A FIGURA 5 (C) trata-se de *sifter* (15), que são fibras que receberam resina mas foram desclassificadas conforme padrão especificado. A FIGURA 5 (D) são fibras do rejeito do desfibrador 1 (12), que são fibras com resina desclassificadas conforme padrão adotado pela empresa, da mesma forma que a FIGURA 5 (E) que são fibras do rejeito do desfibrador 2 (13). A FIGURA 5 (F) trata-se de fibra rejeitadas (16), que são fibras que não estão de acordo com a classificação desejada pela empresa. A FIGURA 5 (G) trata-se de *trimming* (17), que é resíduo de painéis desclassificados e picados, apresentando tamanho entre a placa picada e o rejeito emg. A FIGURA 5 (H) trata-se de placa picada (18), originária dos painéis produzidos desclassificados e que são picados. A FIGURA 5 (I) mostra o rejeito emg (19), que são as aparas dos painéis que são picados. A FIGURA 5 (J) trata-se de rejeito do precipitador (14), que coleta o material particulado que seria emitido para a atmosfera e é acondicionado em caçambas.

FIGURA 6 – BIOMASSAS RESIDUAIS DA ETAPA PÓS PROCESSOS



Fonte: A autora (2019).

A FIGURA 6 (A) trata-se de cavaco (20) que é adquirido de terceiros e tem a finalidade de gerar energia; este material foi alocado na etapa do pós processo, todavia ele não é gerado pelo processo produtivo. A FIGURA 6 (B) mostra o lodo biológico (22), originário de rejeito da cozinha e dos banheiros devidamente neutralizado com produtos químicos. A FIGURA 6 (C) mostra o lodo químico (21) originário do processo de produção de painéis. Integram ainda as biomassas residuais do pós processo as cinzas da planta 1, cinzas da planta 2 e cinzas da planta 3.

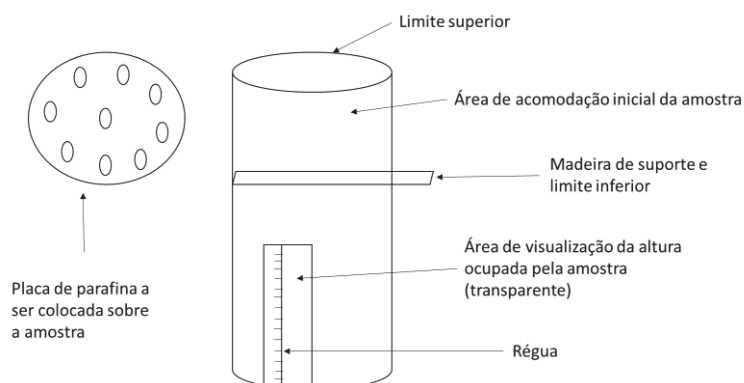
### 3.1 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade foi determinado conforme a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 14929/2017 em triplicata. As amostras foram colocadas em béqueres, no mesmo dia da realização da coleta, pesadas, e levadas para estufa à temperatura de  $105 \pm 2$  °C até obtenção de massa constante.

### 3.2 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente foi determinada conforme adaptação da norma NBR 14984/2003 – ABNT em triplicata, no mesmo dia da coleta. As amostras foram colocadas em um tubo de PVC de 10 cm de diâmetro, na área de acomodação inicial até o limite superior conforme a FIGURA 7. Foi colocada placa de parafina com furos em cima e em seguida retirada a madeira de suporte no limite inferior. A amostra caiu por gravidade e com o auxílio de uma régua foi determinado a altura ocupada, e com esse procedimento teve-se o volume, a amostra foi pesada em balança com precisão de  $\pm 0,01$ , no teor de umidade que se encontrava.

FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO APARATO PARA DETERMINAÇÃO DE DENSIDADE APARENTE



FONTE: A autora (2019)

### 3.3 ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

A análise química imediata é a determinação dos teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ). Estes percentuais foram determinados conforme norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D1762-84 (2013) em triplicata. As amostras foram pesadas em balança analítica, em cadinhos de porcelana previamente calcinados. Foram então colocadas no forno mufla à temperatura de 900 °C por 10 min, sendo 3 min sobre a tampa aberta e 7 min dentro do forno com a porta fechada. Os cadinhos após essa primeira etapa foram acondicionados em dessecadores e resfriados à temperatura ambiente. Foram pesados e a diferença de massa referiu-se à perda de materiais voláteis. Em seguida foram levados novamente ao forno mufla à temperatura de 700 °C para permanecerem por 6 horas. Após esse período, os cadinhos foram levados novamente para o dessecador e depois de resfriados, foram novamente pesados, e essa massa referiu-se ao percentual de cinzas da amostra. O carbono fixo foi determinado pela diferença referente a 100% de amostra inicial.

### 3.4 PODER CALORÍFICO

O poder calorífico superior (PCS) das amostras secas e moídas foi determinado em bomba calorimétrica adiabática (IKA C5000), de acordo norma ASTM D5865 (2013), em duplicata. A unidade utilizada para poder calorífico neste trabalho foi kcal kg<sup>-1</sup>.

Poder calorífico inferior (PCI) foi determinado conforme a equação (1).

$$PCI = PCS - (600 \times 9 \times \frac{H}{100}) \quad (1)$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior; PCS é poder calorífico superior, 600 (kcal kg<sup>-1</sup>) é valor do calor latente de vaporização da água, e H é o teor de hidrogênio.

Poder calorífico inferior útil (PCU) foi determinado conforme a equação (2).

$$PCU = PCI \times \left( \frac{100 - TU}{100} \right) - 6 \times TU \quad (2)$$

Em que: PCU é o poder calorífico inferior útil, PCI é o poder calorífico inferior e TU é o teor de umidade base úmida.

### 3.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR

Os materiais após secos em estufa foram moídos e passados nas peneiras de 40 e 60 *mesh*, sendo utilizado o material retido na peneira de 60 *mesh*. Utilizou-se cerca de 1 mg de amostra em cadinho de estanho, pesado em uma balança analítica, sendo inserido no equipamento onde ocorreu a combustão em presença de oxigênio puro, a uma temperatura de 925 °C, em que todo carbono foi transformado em CO<sub>2</sub>, o hidrogênio em H<sub>2</sub>O e os óxidos de nitrogênio foram reduzidos a nitrogênio (N<sub>2</sub>) em coluna de cobre metálico a 640 °C.

Esses gases foram arrastados pelo gás hélio ultrapuro, separados por uma coluna cromatográfica empacotada em sílica e quantificados no detector de TCD (Detector de Condutividade Térmica) em um equipamento Elemental Analyzer 2400 CHN - Perkin Elmer, tendo sido feito em duplicata. O resultado da análise foi expresso em porcentagem de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (C, H, N). O Oxigênio foi calculado por diferença. O equipamento utilizado: Os resultados apresentados são livres de cinzas tendo sido normalizados para 100%

A análise para determinação do teor de enxofre (S) foi realizada por ICP-OES (espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente) com o espectrômetro Optima 4300 da Perkin Elmer. Já a determinação do teor de cloreto (Cl) foi realizada por titulação com solução padronizada de  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  a  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ .

### 3.6 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Para caracterização dos óxidos presentes nas cinzas, as amostras de biomassa foram queimadas a  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  por 5 horas. Após essa queima, foram moídas e colocadas em estufa a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas. As amostras foram submetidas a análise no espectrômetro de fluorescência de Raios-X Panalytical, modelo Axios Max tubo Ródio 4 kV, em duplicata. Os resultados apresentados foram normalizados para 100%. Os principais óxidos determinados foram  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  e  $\text{MnO}$ .

### 3.7 ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, FORMAÇÃO DE ÁLCALIS E SINTERIZAÇÃO

Com base nos resultados obtidos na análise dos óxidos presentes nas cinzas, (item 3.6), foi realizado o cálculo para as tendências a formação de escórias, incrustações e álcalis, conforme estudo realizado por Jenkins *et al.* (1998).

Para indicação de formação de escórias (ESC) foi utilizada a relação base-ácido  $\left(\frac{B}{A}\right)$  conforme a equação (3).

$$ESC = \frac{B}{A} = \frac{(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5)}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)} \quad (3)$$

Para a indicação de formação de incrustação (INC) foi utilizada a equação 4.

$$INC = \left(\frac{B}{A}\right) (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (4)$$

Para a indicação de formação de álcalis (ALC), foi utilizada a equação 5.

$$ALC = \frac{(CZ(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))}{PCS} \quad (5)$$

Para avaliação dos resultados obtidos, estes seguiram os valores de referência para os índices de propensão a formação de escória, incrustação e álcalis são mostrados na TABELA 1.

TABELA 1 - VALORES DE REFERÊNCIA PARA OS ÍNDICES DE PROPENSÃO À FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO E ÁLCALIS

Escoriação	Incrustação	Álcalis
$B/A < 0,5$ - baixa propensão a escoriação	$FI < 0,6$ - baixa propensão a incrustação	$0,17 < IA < 0,34$ - propensão a incrustação e escoriação
$0,5 \leq B/A < 1,0$ - media propensão a escoriação	$0,6 \leq FI < 40$ - alta propensão a incrustação	$IA \geq 0,34$ - certa a ocorrência de incrustação e escoriação
$1,0 \leq B/A < 1,75$ - alta propensão a escoriação	$FI \geq 40$ - extremamente alta propensão a incrustação	
$B/A \geq 1,75$ - severa propensão a escoriação		

Fonte: Jenkins *et al* (1998).

O risco de sinterização (SIN), óxidos alcalinos-terrosos em relação aos alcalinos, foi calculado com base no estudo de Fernández *et al.* (2016) utilizando a equação 6.

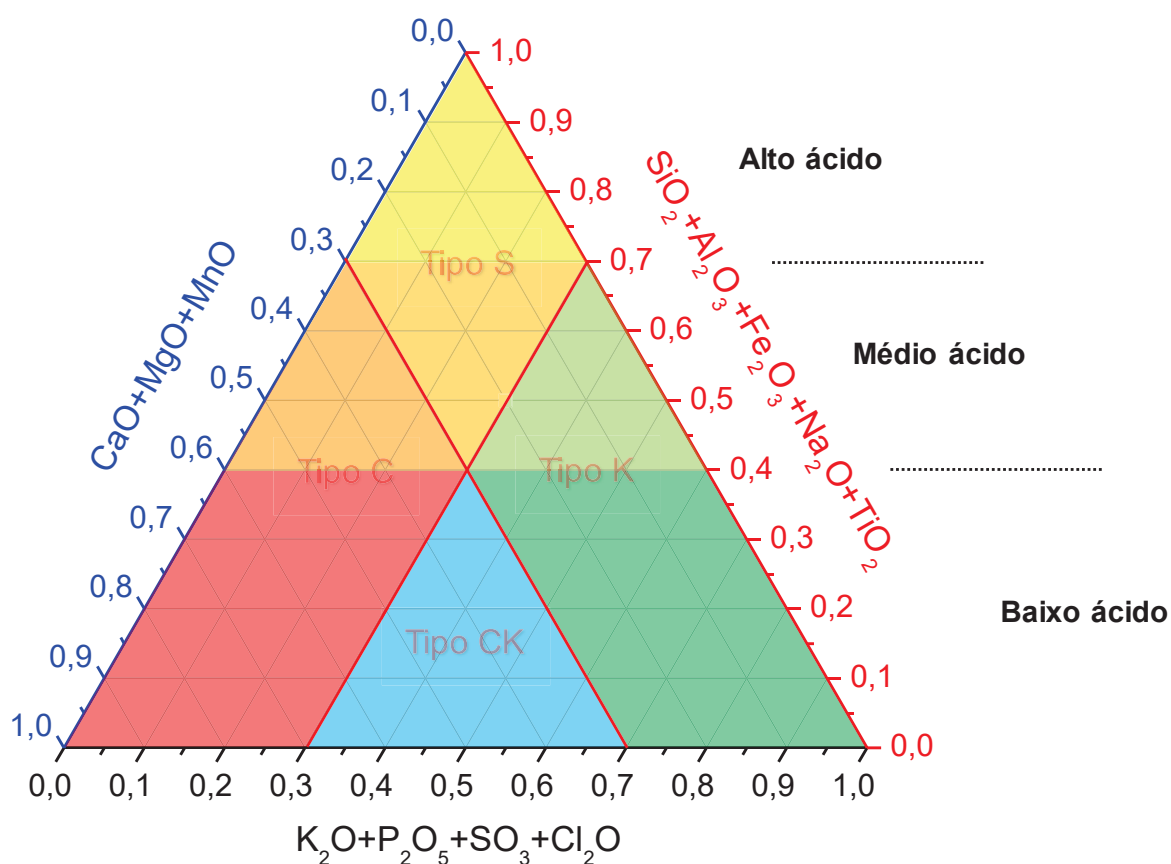
$$SIN = \frac{CaO + MgO}{K_2O + Na_2O} \quad (6)$$

Segundo o estudo, se o valor obtido for maior que 2 o material não deve apresentar risco de sinterização.

Ainda analisando óxidos presentes nas cinzas, estes podem ser agrupados em função do óxido predominante (JENKINS *et al.*, 1998). Esses óxidos foram agrupados em três pares de óxidos mais abundantes Si-Al, Ca-Óxidos de Mg e K-P, de acordo com a correlação positiva e negativa de valores entre eles. A especificação dessas combinações é baseada sobre as fortes correlações positivas entre os óxidos nas combinações e suas correlações negativas com outros óxidos presentes nas cinzas (VASSILEV *et al.*, 2014). No tipo S, a predominância é do óxido de silício, no Tipo C é o óxido de cálcio; no tipo K o dióxido potássio e o tipo CK é uma junção do óxido de cálcio como o dióxido de potássio.

Na Figura 8 tem-se as áreas de predominância de cada óxido no gráfico ternário.

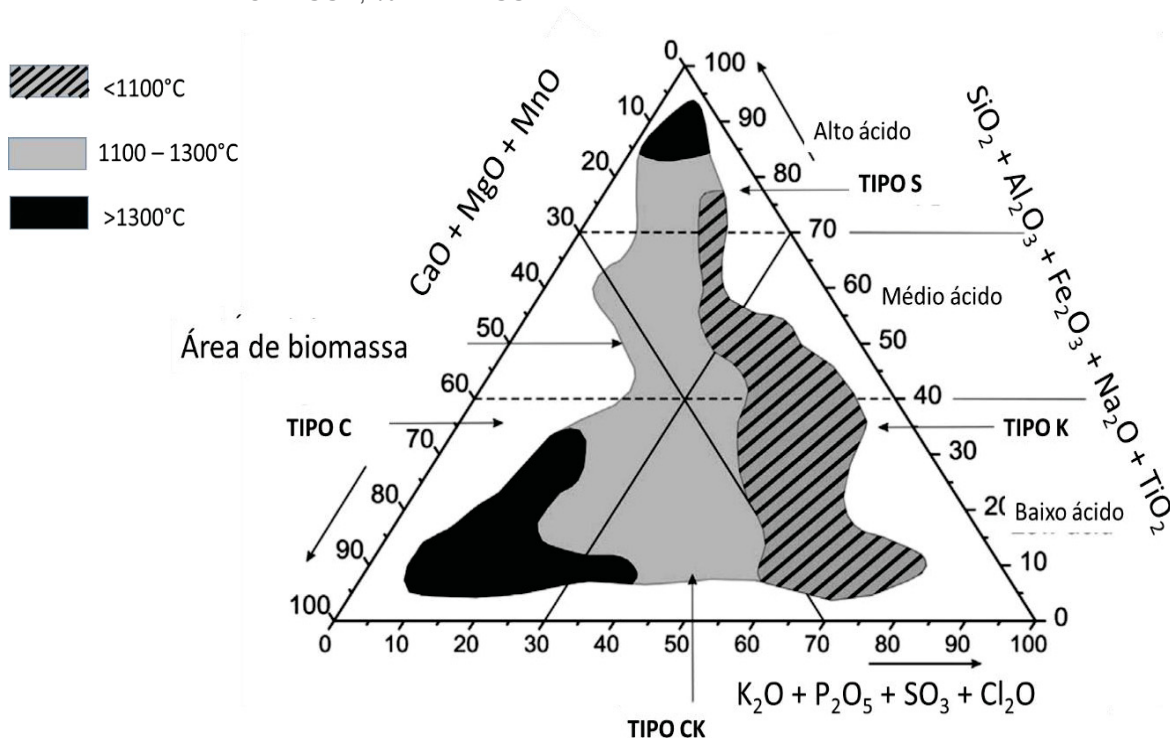
FIGURA 8 - ÁREAS DE PREDOMINÂNCIA DOS ÓXIDOS NO GRÁFICO TERNÁRIO



FONTE: A autora (2019).

A FIGURA 9 apresenta as áreas de temperatura de fusão das cinzas na deformação inicial para 55 variedades de biomassas no sistema de classificação química de cinza de biomassa, % em massa, no estudo realizado por Vassilev *et al* (2014).

FIGURA 9 - TEMPERATURA DE FUSÃO DAS CINZAS NA DEFORMAÇÃO INICIAL PARA 55 VARIEDADES DE BIOMASSA NO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DE CINZA DE BIOMASSA, % EM MASSA



FONTE: Adaptado de Vassilev *et al*, 2014.

### 3.8 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

As emissões atmosféricas (material particulado (MP), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )), provenientes da combustão das amostras foram estimadas conforme as metodologias adotadas por USEPA (1995, 2001) e complementada pela CETESB (2015) e é apresentada na equação (7).

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (7)$$

Em que:

E = emissão do poluente, em  $\text{ton ano}^{-1}$ ;

A = consumo de combustível, em  $\text{ton ano}^{-1}$ ;

EF = fator de emissão de lenha e cavaco. Para material particulado (MP) 3,13; para  $\text{NO}_x$  0,75; para  $\text{SO}_x$  0,14; para CO 3,35.



ER = eficiência global de redução das emissões, em função da utilização de equipamentos de controle de poluição do ar (ECP), em % (99 % para precipitador eletrostático).

A determinação das emissões de CO<sub>2</sub> também seguiu a metodologia apresentada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2009), onde as emissões de CO<sub>2</sub> são determinadas multiplicando-se o teor de carbono existente na amostra pela relação 44/12 (razão da massa molecular do CO<sub>2</sub> para C).

### 3.9 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

A partir do consumo de cada biomassa fornecido pela empresa e da determinação do poder calorífico útil, foi estimada a quantidade de energia gerada pelas amostras em kWh conforme a equação 8.

$$E = \left( \frac{PCU}{860} \right) \cdot m \quad (8)$$

Em que: E = energia (kWh); m é a quantidade de biomassa consumida (kg), PCU é o poder calorífico inferior útil em kcal kg<sup>-1</sup> e 860 é o fator de conversão de kcal para kWh.

### 3.10 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

As biomassas residuais das etapas nos processos produtivos foram rearranjadas em sete grupos com base na similaridade dos aspectos físicos, e compreendem: casca, pó, cavaco, partículas, fibras, rejeitos do processo e lodo.

O grupo casca compreende quatro biomassas: casca sem mistura, casca silo biomassa, casca moinho a martelo e casca de varredura. O grupo pó compreende em amostras de: pó de lixadeira e pó de CICE. O grupo cavaco se refere ao cavaco e *over* do crivo. O grupo partículas em finos do crivo, finos úmidos, saída do secador, serragem da centrífuga. Para o grupo fibras são amostras de: *sifter*, fibra rejeitada, rejeito desfibrador planta 1, rejeito desfibrador planta 2. O grupo rejeito de processo produtivo: placa picada, rejeito emg, *trimming*, rejeito precipitador. O grupo lodo compreende lodo biológico e lodo químico.

A partir da quantidade total consumida na indústria e do percentual que cada grupo de biomassa residual participou nesse consumo, foram estimados por média ponderada, os valores para os parâmetros: teor de umidade, densidade, poder calorífico, análise química imediata, fluorescência de raios X, escória, incrustação, álcali, sinterização que haviam sido determinados individualmente. Considerando esse valor estimado como base, foram feitas variações na participação de um grupo em função do cavaco, e os demais permaneceram fixos. No grupo casca, a variação proposta foi maior que para os demais grupos porque maiores produções de resíduos destes últimos podem significar ineficiência no processo produtivo dos painéis. O objetivo dessa variação foi avaliar em função da combinação dos resíduos uma melhoria na geração de energia e assim diminuir a dependência do cavaco adquirido de terceiros, uma vez que a quantidade de energia gerada com a biomassa residual não é suficiente para suprir a demanda da indústria.

### 3.11 ESTATÍSTICA

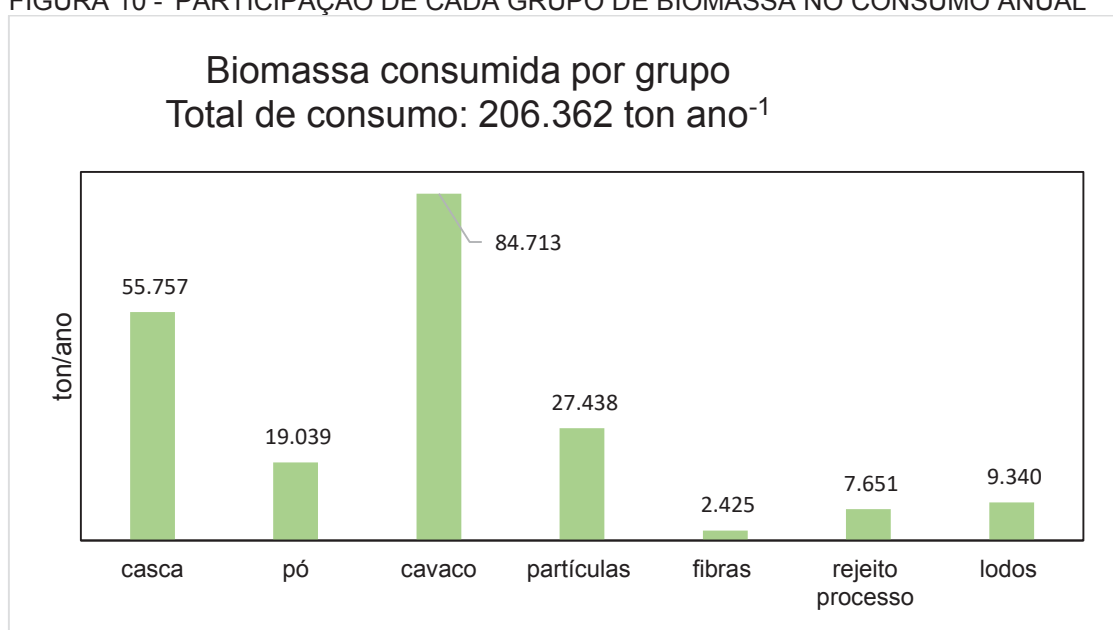
A análise de variância foi aplicada às variáveis estudadas para verificar diferenças significativas nas biomassas individualizadas, utilizando o modelo geral multivariado. Para as variáveis que apresentaram diferenças significativas, o teste Tukey foi aplicado a 95% de nível de confiança, utilizando o software IBM SPSS *Statistics* 23.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA RESIDUAL

Os dados recebidos da empresa sobre consumo de biomassa para energia durante um ano se encontram na FIGURA 10 e foram considerados como base para cálculos de estimativas de combinações de distintas biomassas visando melhoria na geração de energia.

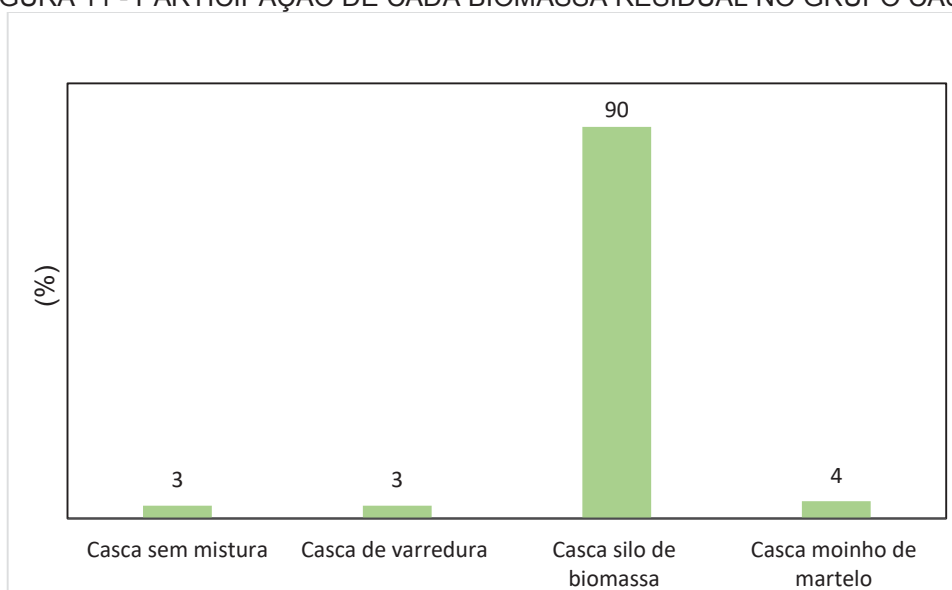
FIGURA 10 - PARTICIPAÇÃO DE CADA GRUPO DE BIOMASSA NO CONSUMO ANUAL



FONTE: A autora (2019).

Como pode ser observado a maior participação para geração de energia são as biomassas residuais geradas no processo produtivo, correspondendo a 60% do consumo total. As FIGURAS 11 a 17 apresentam a participação de cada biomassa residual em cada um dos grupos formados na FIGURA 10.

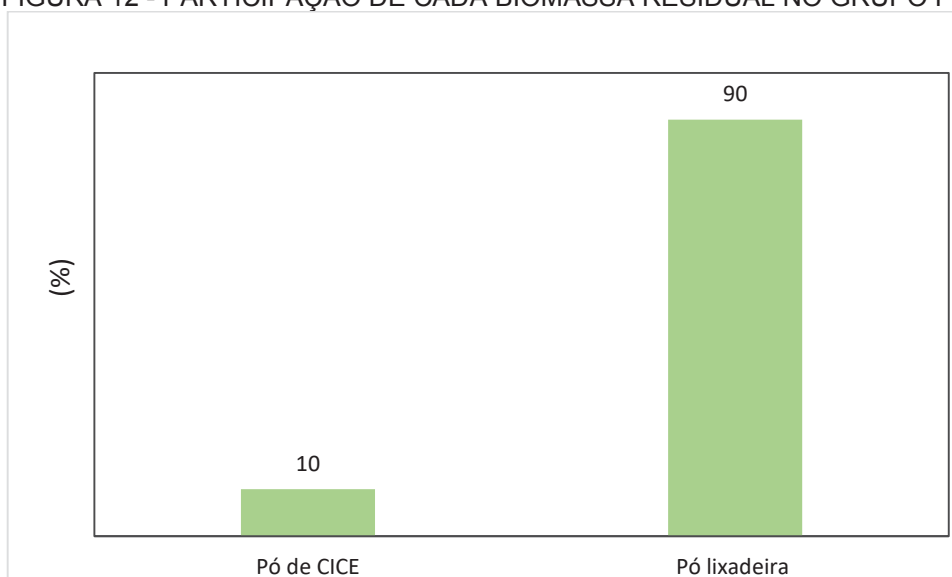
FIGURA 11 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO CASCA



FONTE: A autora (2019).

No grupo casca, a participação mais expressiva é a casca armazenada no silo de biomassa e por essa razão os parâmetros determinados nesse grupo apresentam características predominantes dessa biomassa residual nesse grupo.

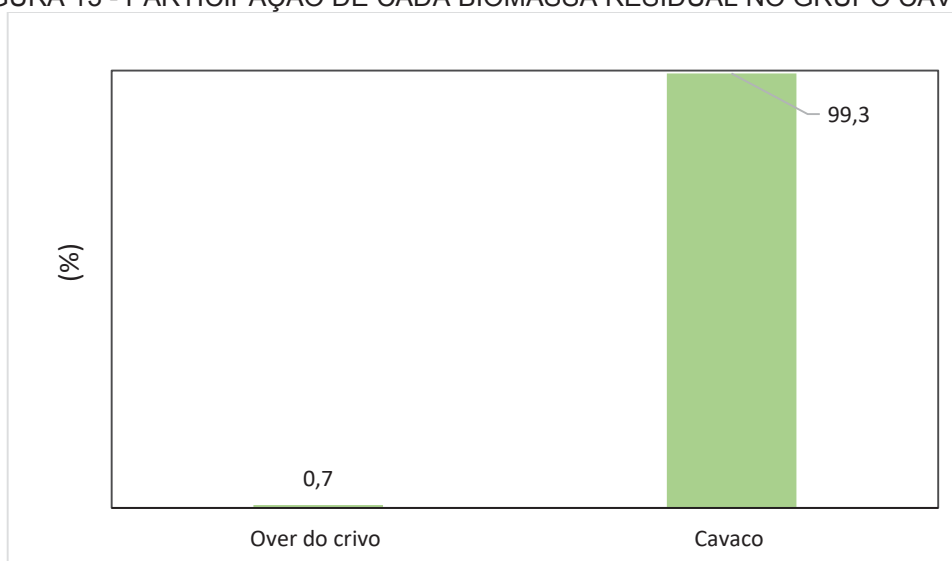
FIGURA 12 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO PÓ



FONTE: A autora (2019).

O pó de lixadeira foi o majoritário no grupo pó e os parâmetros avaliados foram apresentaram as características desse material.

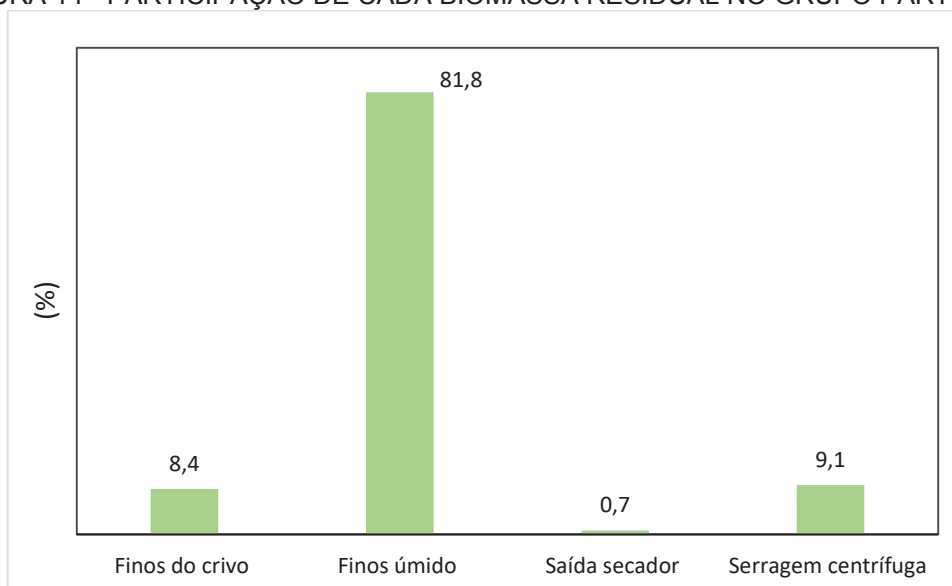
FIGURA 13 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO CAVACO



FONTE: A autora (2019).

No grupo cavaco basicamente a biomassa residual foi o cavaco, adquirido de terceiros. Embora seja um percentual mínimo o *over* do crivo, foi optado por não desconsiderar nenhuma biomassa residual nas formações dos grupos.

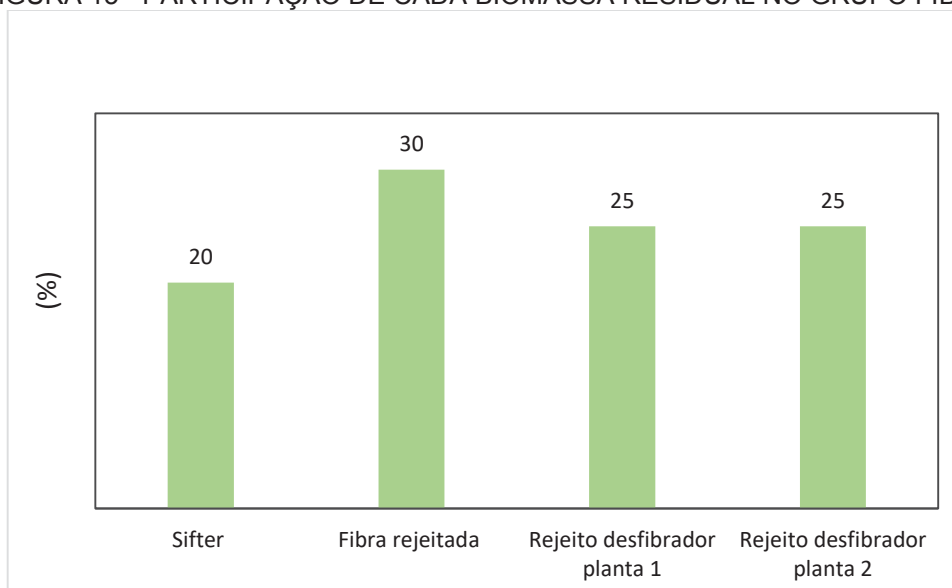
FIGURA 14 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO PARTÍCULA



FONTE: A autora (2019).

O grupo partícula apresenta maior participação da biomassa residual finos úmido. Nenhuma biomassa residual foi desconsiderada, mesmo representando menos de 1% de participação, isso porque ela foi gerada e precisa ter destinação.

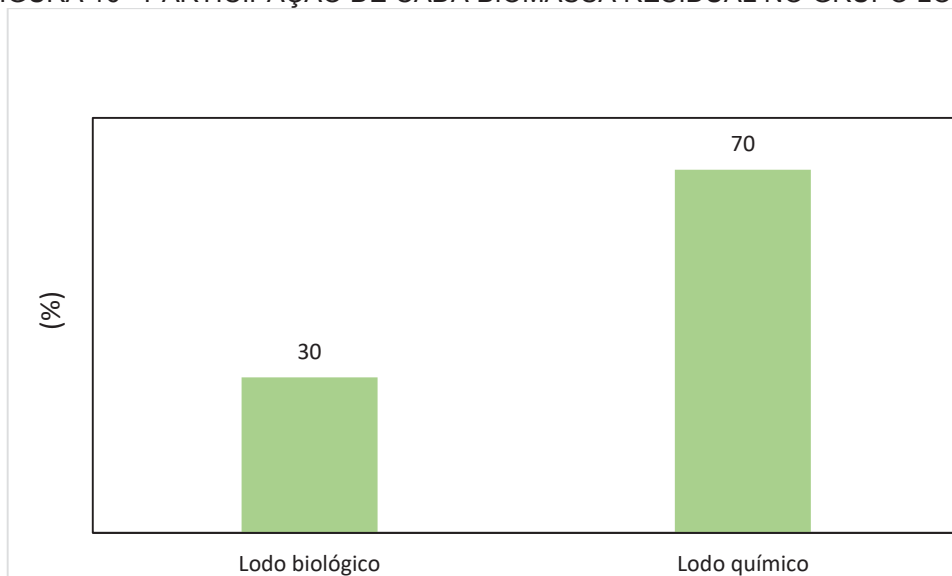
FIGURA 15 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO FIBRA



FONTE: A autora (2019).

As biomassas residuais que pertencem ao grupo fibra apresentam percentuais mais homogêneos, sendo a fibra rejeitada um pouco mais que as demais.

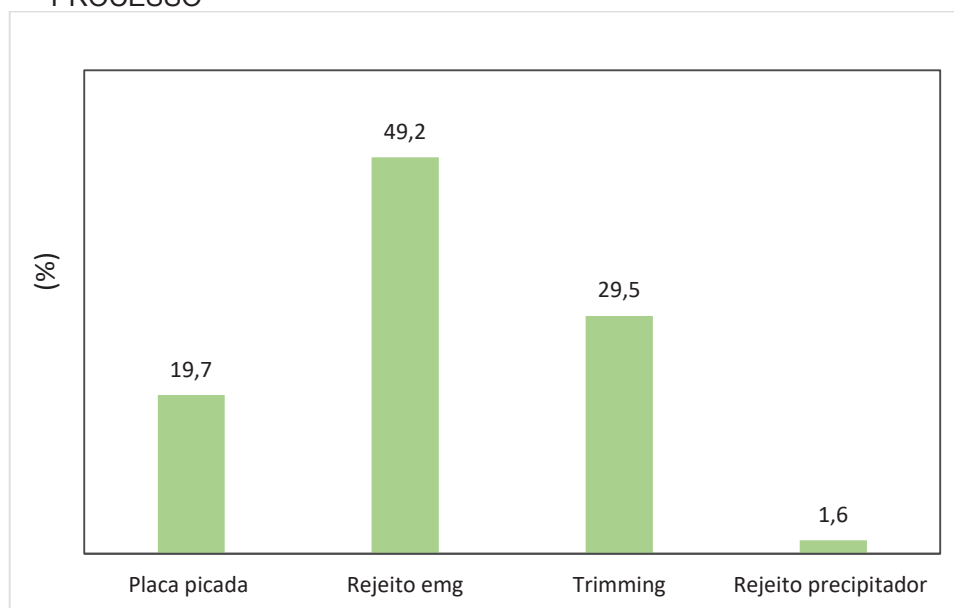
FIGURA 16 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL NO GRUPO LODO



FONTE: A autora (2019).

No grupo lodo a participação mais expressiva é do lodo químico, proveniente do processo produtivo dos painéis.

FIGURA 17 - PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA RESIDUAL DO GRUPO REJEITO DO PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

No grupo rejeito do processo a participação mais significativa é a biomassa residual rejeito emg com quase 50%, que são aparas dos painéis.

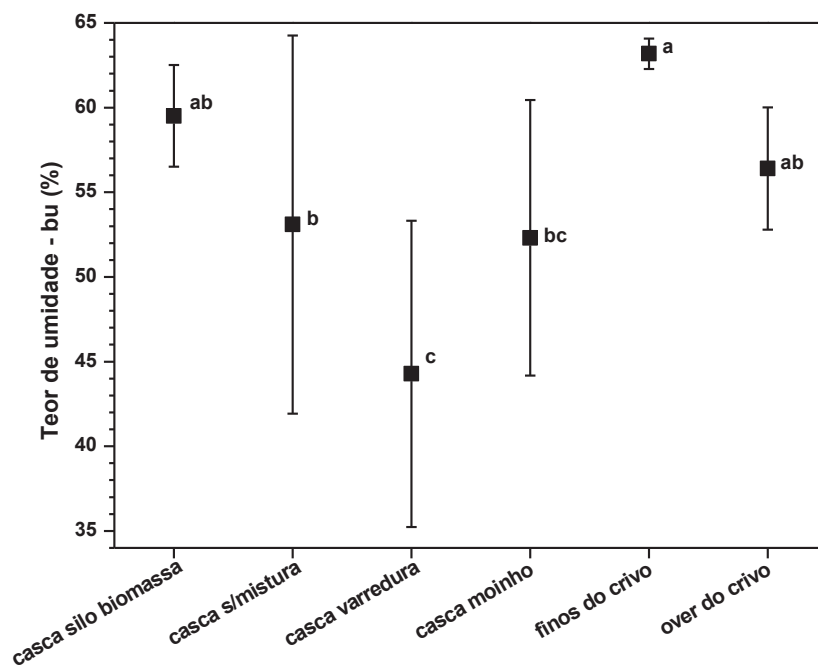
## 4.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS BIOMASSAS RESIDUAIS

### 4.2.1 Propriedades físico-químicas e energética

#### 4.2.1.1 Teor de umidade

AS FIGURAS 18 a 21 apresentam os teores de umidade base úmida das biomassas residuais coletadas na indústria de painéis no Paraná.

FIGURA 18 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ-PROCESSO



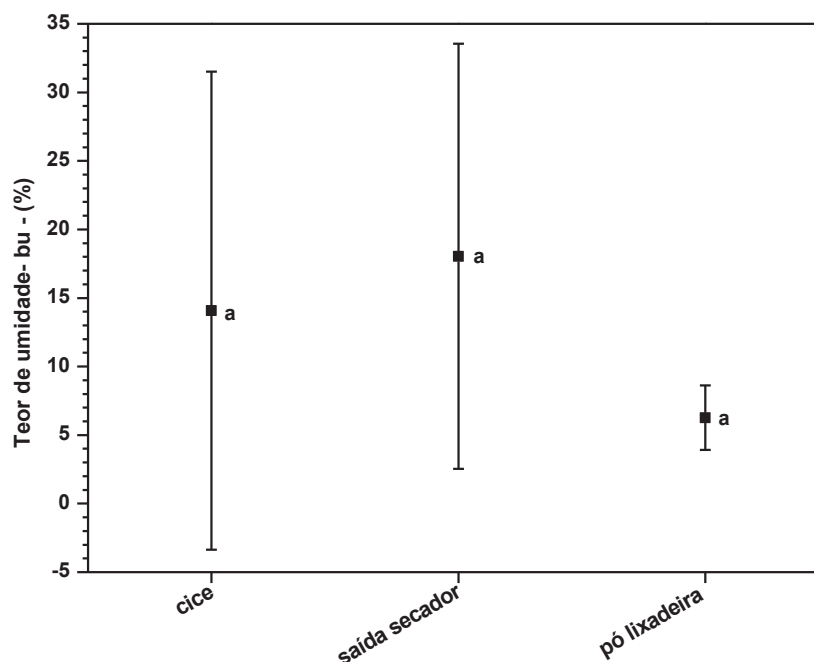
FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do teste de Tukey a 95% de significância.

Os teores de umidade das biomassas residuais do pré-processo variaram em média de 44,28 a 63,18%, pois ficavam expostas ao tempo, sem cobertura, sendo a amostra finos do crivo estatisticamente superior às demais. Pode ser observado que os teores de umidade das amostras do pré processo, embora altos, ficaram dentro do recomendado pela literatura.



FIGURA 19 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP

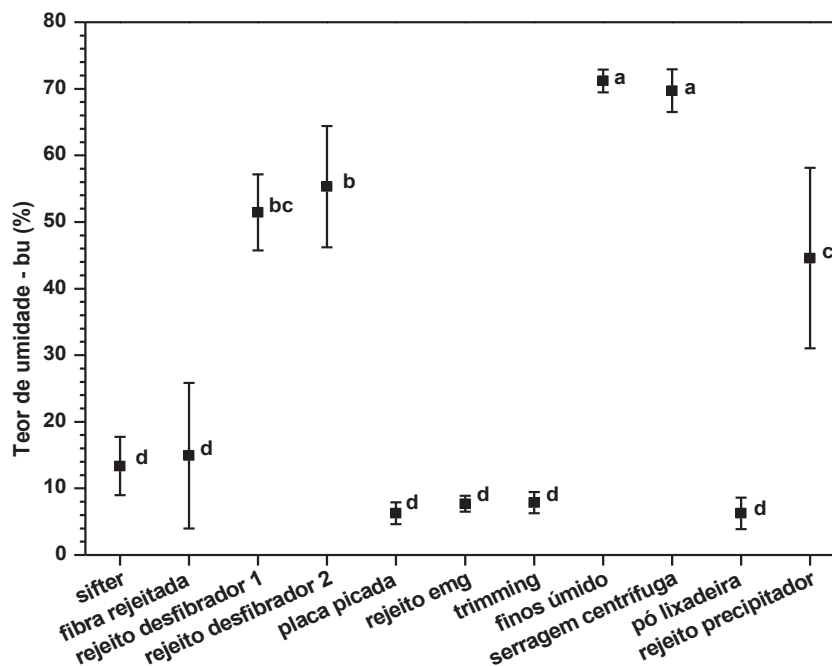


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do teste de Tukey a 95% de significância.

As biomassas residuais do processo MDP variaram em média de 6,26 a 18,03%. Esses teores de umidade são menores que no pré-processo porque nesse momento do processo produtivo as amostras foram secas. As amostras desse processo com relação ao teor de umidade se apresentaram iguais estatisticamente, fato que pode ser justificado pelo desvio das médias, pois as biomassas residuais foram umidificadas com o objetivo de minimizar riscos de combustão no local de armazenamento.

FIGURA 20 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF

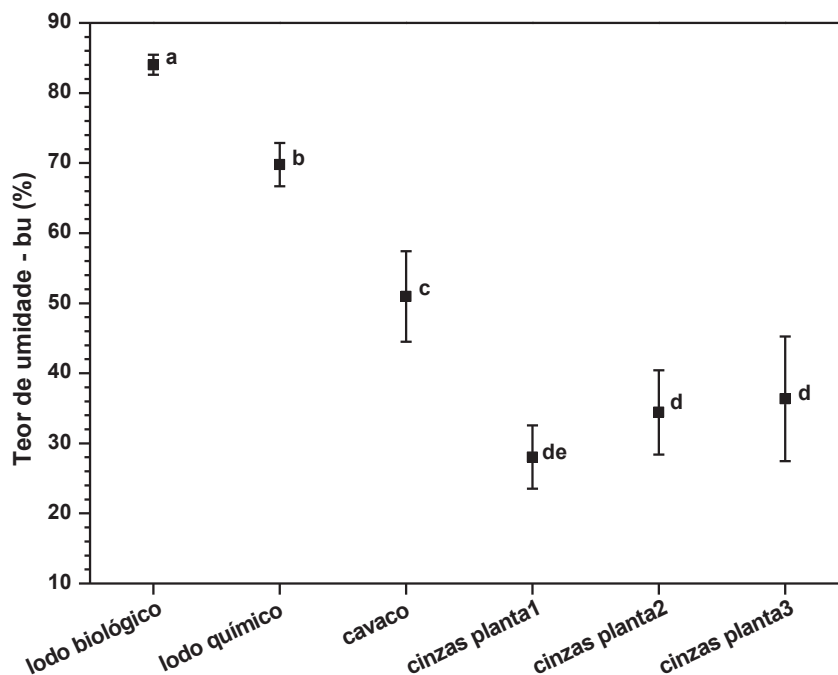


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do teste de Tukey a 95% de significância.

Os teores de umidade médios das biomassas residuais pertencentes ao processo MDF variaram de 6,26 a 71,18%. Os menores valores das amostras desse processo se justificam por terem sido secas em função do processo produtivo e os maiores valores determinados, que foram para serragem da centrífuga e finos úmido, 69,71 e 71,18%, respectivamente, se justificam porque as amostras foram obtidas logo após o amolecimento da serragem e das fibras.

FIGURA 21 - VALORES MÉDIOS DO TEOR DE UMIDADE NA BASE ÚMIDA DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS-PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do teste de Tukey a 95% de significância.

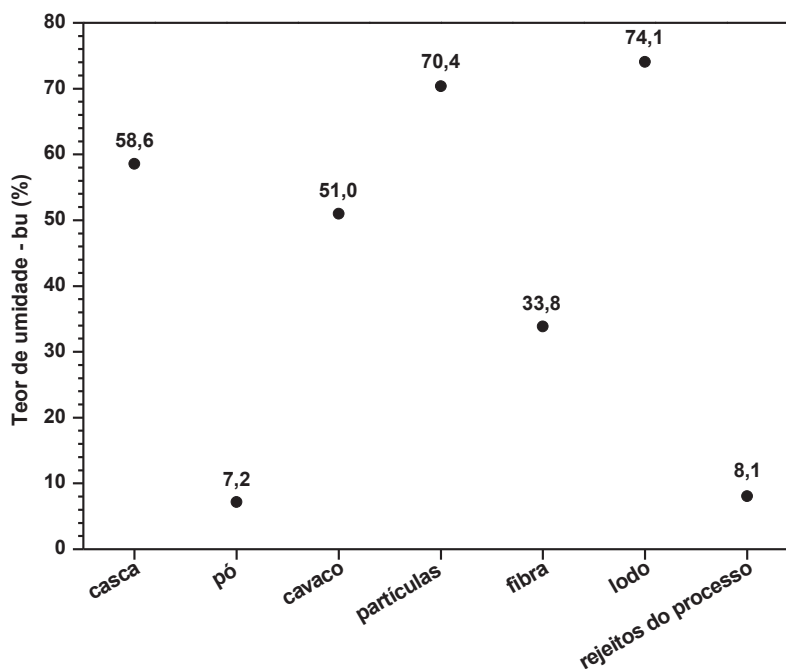
As médias dos teores de umidade das biomassas residuais do pós-processo variaram de 52,11 a 84,03%, considerados valores altos segundo a literatura. Os maiores teores foram determinados para os lodos químico e biológico. O teor de umidade dos cavacos médio foi de 50,96%.

O teor de umidade da biomassa é o principal parâmetro que afeta a disponibilidade de energia, a eficiência da caldeira e a estabilidade da combustão, podendo causar problemas de ignição, decréscimo no poder calorífico superior, aumento na produção de CO e material particulado como a fuligem (DEMIRBAS, 2004; PALACKA *et al.*, 2017; HERNANDEZ *et al.*, 2018).

O máximo teor de umidade das biomassas admitido em processos termoquímicos é de 65%, a fim de reduzir a tendência em bloqueios no sistema de alimentação, pois aumenta o volume da biomassa, e possíveis corrosões nas superfícies metálicas. Teor de umidade entre 10 e 20% na base úmida é o ideal para a maioria dos processos de conversão da biomassa. Valores superiores conduzem a uma redução da eficiência na combustão da mesma forma que combustíveis excessivamente secos aumentam a possibilidade de refluxo de materiais de gás e leito do reator (MATTSSON; KOFMAN, 2003; DAI *et al.*, 2012).

Ao formar os grupos de biomassa residual, considerando a similaridade física das mesmas, os teores médios de umidade se modificam conforme pode ser observado na FIGURA 22.

FIGURA 22 - TEORES DE UMIDADE EM BASE ÚMIDA ESTIMADOS DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS



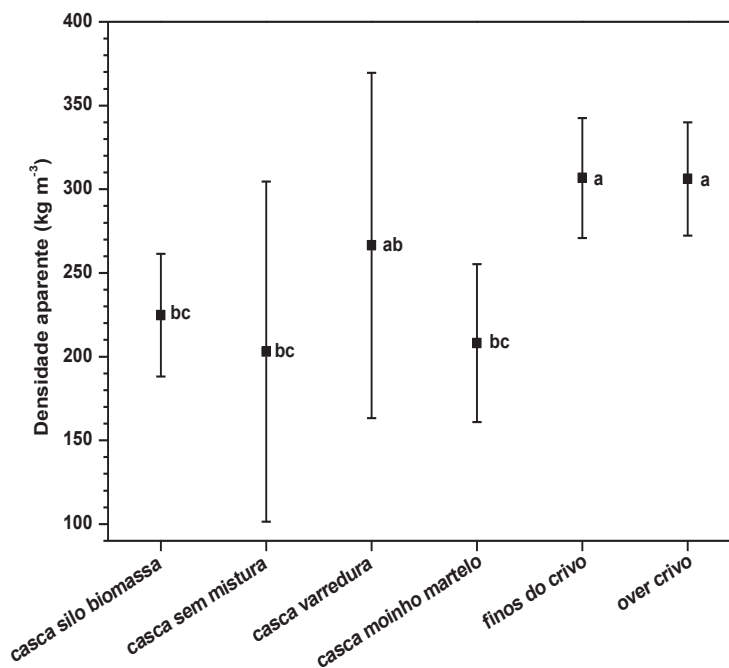
FONTE: A autora (2019).

Pode ser observado que os teores de umidade na formação dos grupos apresentaram diminuição nos percentuais. Observa-se que o maior teor de umidade que era do lodo de 84% baixou para 74%, provavelmente por ocorrer um equilíbrio nos teores de umidade dos dois lodos além da participação percentual de cada um. Os grupos partículas e lodo apresentaram percentuais de teor de umidade maiores que o recomendado pela literatura.

#### 4.2.1.2 Densidade Aparente

AS FIGURAS 23 a 26 apresentam os valores médios das densidades aparentes a granel nas biomassas residuais coletadas na indústria de painéis no Paraná.

FIGURA 23 - VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO

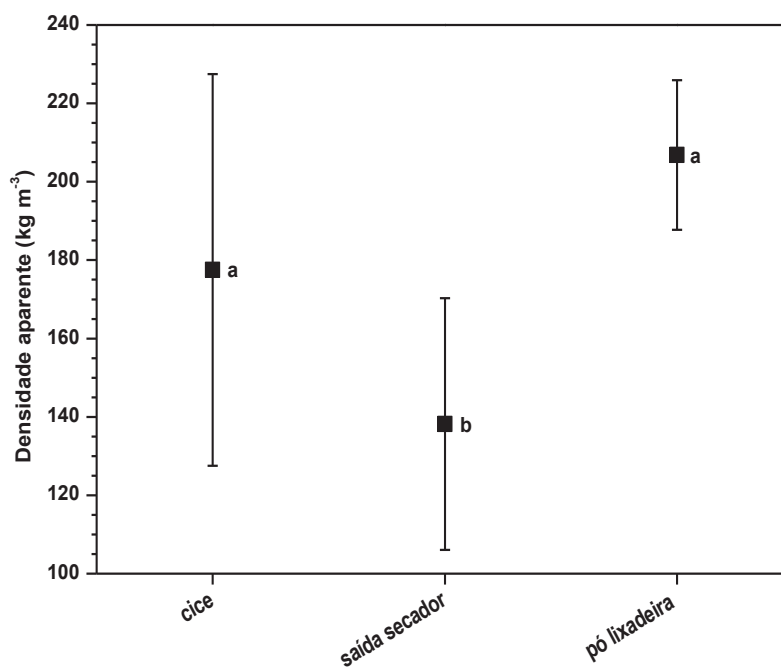


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

As densidades médias das biomassas residuais do pré-processo variaram de 208 a 306 kg m<sup>-3</sup>. Os maiores desvios apresentados para casca se deve ao fato de serem materiais com tamanhos irregulares.

FIGURA 24 - VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP

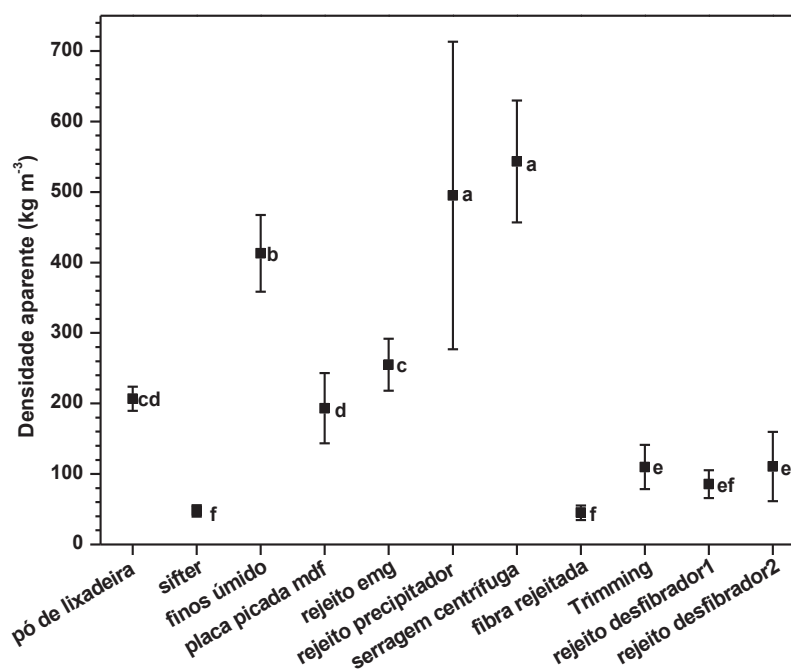


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

As densidades médias das biomassas residuais do processo MDP variaram de 138 a 219 kg m<sup>-3</sup>. Embora tenham tamanhos mais regulares, a variação da densidade pode ser justificada pelo fato do teor de umidade, pois a densidade aparente foi realizada na umidade coletada na época.

FIGURA 25 - VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF

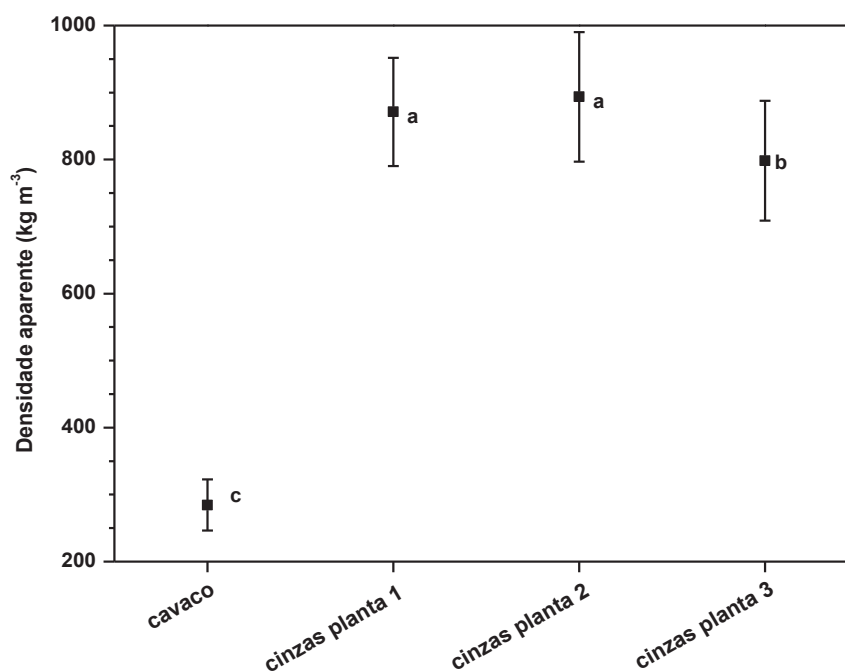


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

As densidades médias das biomassas residuais do processo MDF variaram de 45 a 543 kg m<sup>-3</sup>. As maiores determinações das densidades ocorreram para finos úmido, rejeito do precipitador e para serragem da centrífuga, fato que pode ser justificado pelo teor de umidade. As fibras pertencentes a essa etapa foram as que apresentaram o menor valor para as densidades determinadas, isso porque ocupam o volume com pouca massa.

FIGURA 26 - VALORES MÉDIOS DAS DENSIDADES APARENTES A GRANEL NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

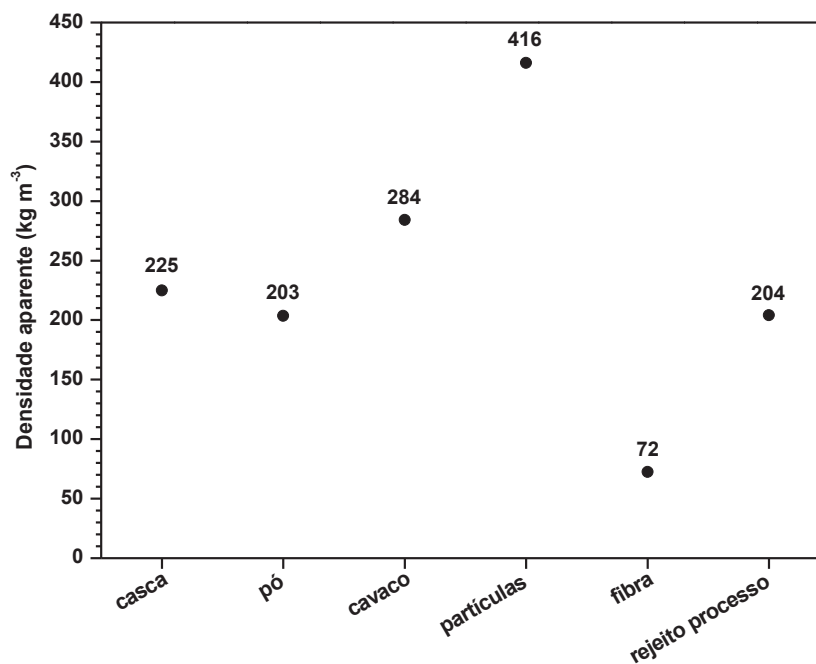
A densidade aparente média do cavaco de 284 kg m<sup>-3</sup> é apresentada na FIGURA 26. As amostras cinzas apresentaram os maiores valores por serem basicamente areia e receberem jato de água antes de serem armazenadas nas caçambas.

A densidade aparente a granel, ou seja, a densidade do material de acordo com a forma e teor de umidade que se encontra, leva em consideração os espaços vazios existentes na amostra. É importante conhecer porque esta densidade afeta requisitos de armazenamento, dimensionamento do sistema de manuseio de materiais e o conhecimento de como o material se comportará durante o processo de queima (MCKENDRY, 2002). Segundo Fournel *et al.* (2015), tamanhos diferentes de partículas e com baixas densidades não permitem um fluxo constante na câmara de combustão, podendo ocorrer a combustão incompleta, fuligem e alcatrão.

A FIGURA 27 apresenta os valores médios das densidades aparentes estimadas dos grupos de biomassa residual formados.



FIGURA 27 - MÉDIA ESTIMADA DA DENSIDADE APARENTE A GRANEL DAS AMOSTRAS DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS



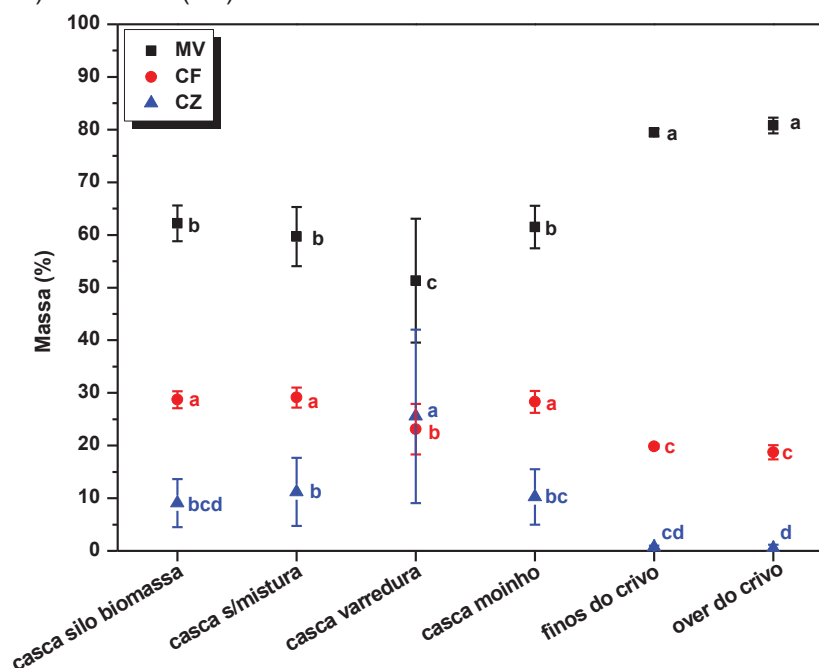
FONTE: A autora (2019).

Segundo Dai *et al.* (2012) a densidade a granel é importante quando se discute transporte de biomassa e alimentação, uma vez que afeta diretamente o fluxo propriedades da biomassa, bem como custos de transporte. Pode ser observado na FIGURA 18 que na formação dos grupos a densidade a granel se concentra na faixa de 200 e 300 kg m<sup>-3</sup>, exceto para os grupos partícula em função do teor de umidade elevado e do grupo fibra em função da característica do material que compõe o grupo, provavelmente gerando fuligem.

#### 4.2.1.3 Teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas

AS FIGURAS 28 a 31 apresentam os valores médios dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas para as biomassas residuais coletadas na indústria de painéis no Paraná.

FIGURA 28 - VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS - PRÉ PROCESSO

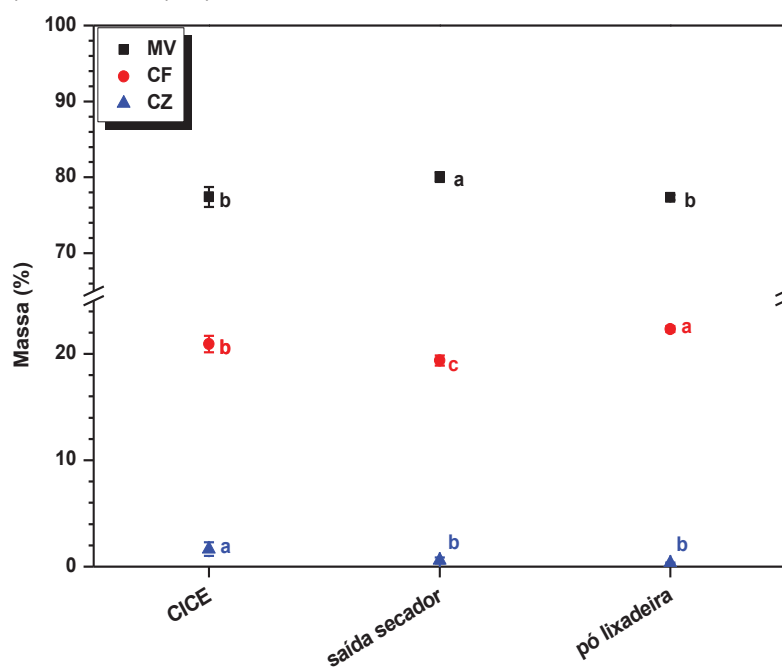


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

Os teores médios nas amostras no pré-processo em relação aos materiais voláteis foram maiores para os finos de crivo e over do crivo e menor para as cascas, variando de 80,79 a 51,32%. Para os teores médios de carbono fixo, ocorreu o inverso, já esperado, maiores para as cascas e menores para finos e over do crivo, variando de 29,11 a 18,72%. Os teores de cinzas foram discrepantes, sendo os menores para over e finos do crivo, 0,71 e 0,49% respectivamente, e 9,08 a 25,56% para as cascas, sendo a maior para a casca de varredura. Esse teor se justifica por conter misturado na casca lama, terra, pedra, decorrente da varredura da carroceria dos caminhões de transporte e do pátio, fato esse que confirma o que foi afirmado por Fernandez (2016).

FIGURA 29 - VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS - PROCESSO MDP

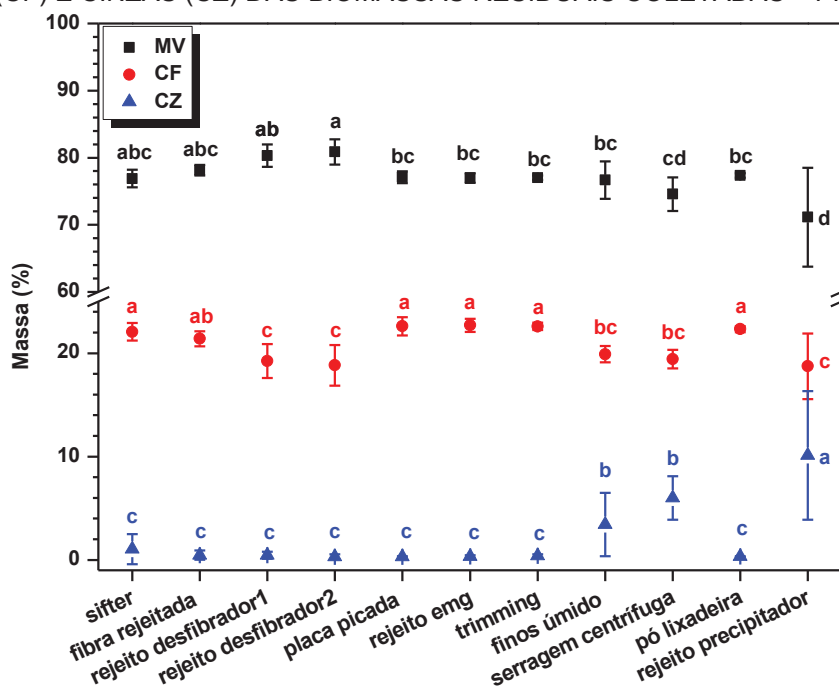


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

As amostras do processo MDP apresentaram comportamento estável ao longo do tempo, apresentando um pequeno desvio padrão para as três variáveis determinadas para análise química imediata. As médias variaram de 77,34 a 80,04% para materiais voláteis, 19,37 a 22,34% para carbono fixo e 0,33 a 1,65% para teor de cinzas.

FIGURA 30 - VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS – PROCESSO MDF

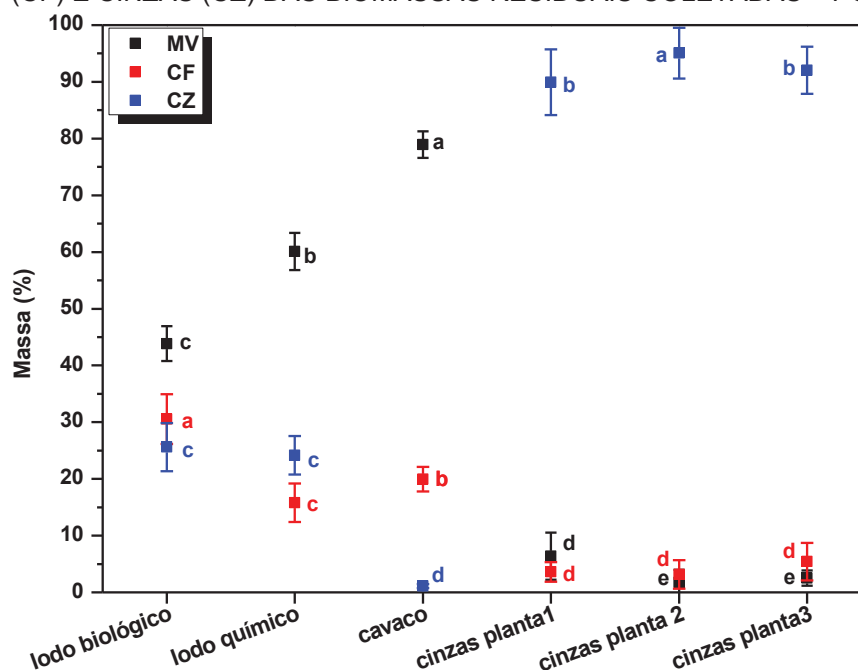


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

Pode-se observar que assim como no processo MDP, as amostras do processo MDF apresentaram comportamento estável, com pequeno desvio padrão ao longo do tempo para os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. O maior desvio foi determinado para o rejeito do precipitador, fato justificado por ter sofrido vários ajustes no processo produtivo durante o período de coleta.

FIGURA 31 - VALORES MÉDIOS DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS (MV), CARBONO FIXO (CF) E CINZAS (CZ) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS – PÓS PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

As amostras do pós-processo apresentaram resultados bastante diversos para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. As três diferentes cinzas apresentaram baixos teores de materiais voláteis e carbono fixo e altos teores para as cinzas de 89,92 a 95,06%, resultado que demonstra uma queima satisfatória uma vez que com esse percentual de material inorgânico não ocorre combustão. As outras amostras variaram de 43,85 a 78,95% em materiais voláteis e 15,78 a 30,54% em carbono fixo. Os teores de cinzas variaram de 1,09 a 25,61%, sendo estes últimos relativos ao lodo. O processo de neutralização dos lodos biológico e químico pode ser o fator que justifica o alto teor de cinzas.

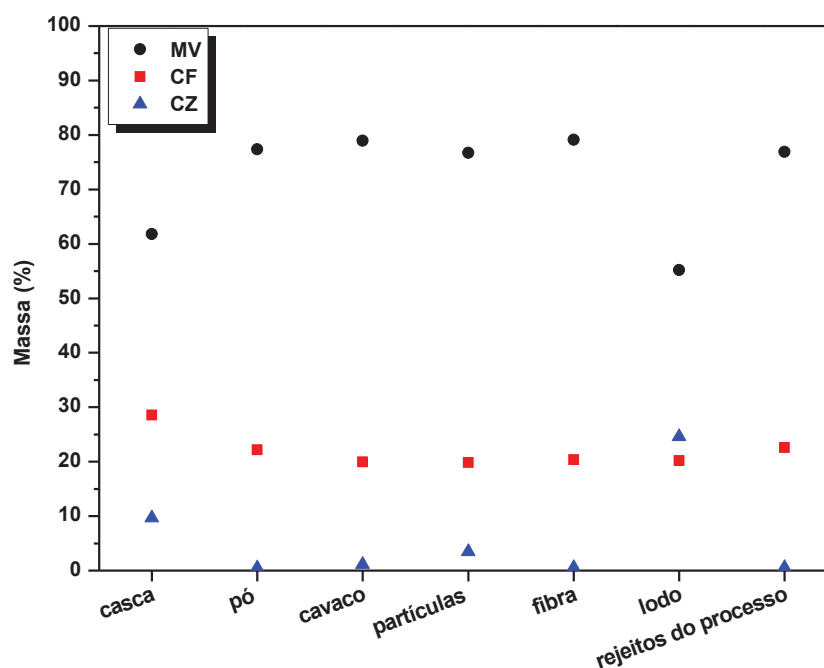
Segundo Özyuguran e Yaman (2017) as cinzas além de apresentar efeito prejudicial sobre o calor aparente obtido na queima da biomassa, retira energia que seria transferida para o sistema para a formação e transição de fase dos inorgânicos presentes na biomassa. Fernandez (2016) destaca que o teor de cinzas pode aumentar consideravelmente as pedras, areia e / ou poeira forem aderidos a biomassa durante o corte, coleta ou manuseio.

Mckendry (2002) afirma que dependendo da quantidade do teor de cinzas, a energia disponível do combustível é reduzida proporcionalmente. Em um processo de conversão termoquímica, a composição química da cinza pode apresentar problemas

operacionais significativos, podendo formar escória, que pode resultar em redução da eficiência energética da planta térmica e aumento dos custos operacionais.

A FIGURA 32 apresenta os valores médios dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos grupos de biomassas formados no percentual de participação base.

FIGURA 32 - TEORES MÉDIOS ESTIMADOS DE MATERIAIS VOLÁTEIS, CARBONO FIXO E CINZAS PARA OS GRUPOS DE BIOMASSAS RESIDUAIS FORMADOS



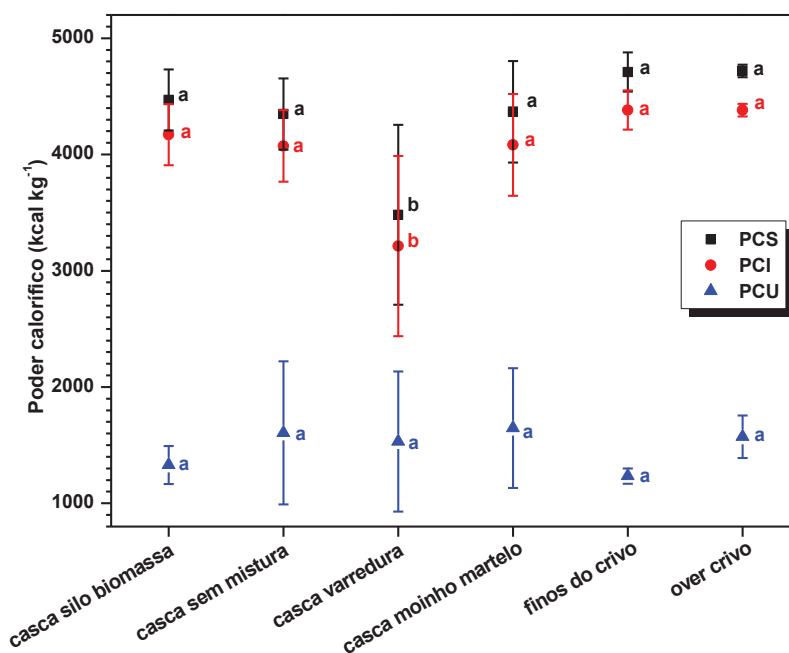
FONTE: A autora (2019).

Como pode ser observado na FIGURA 32 os resultados para o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas apresentaram o mesmo comportamento que as matérias-primas antes da composição. Com relação aos teores de materiais voláteis Özyuguran e Yaman (2017) afirmam que altos teores não significam alto poder calorífico superior, uma vez que alguns componentes destes materiais voláteis são formados a partir de gases não combustíveis como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Com relação as cinzas o valor percentual ficou um pouco abaixo do que antes da mistura, podendo ser justificada essa redução em função do percentual de participação de cada biomassa, sendo o maior valor de teor de cinzas para o lodo. De acordo com Vieira *et al.* (2013) as cinzas são consideradas material abrasivo que podem vir a causar problemas de corrosão em equipamentos metálicos.

#### 4.2.1.4 Poder Calorífico

AS FIGURAS 33 a 36 apresentam os valores médios do poder calorífico superior, inferior e útil das biomassas residuais coletadas na indústria de painéis no Paraná.

FIGURA 33 - VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO

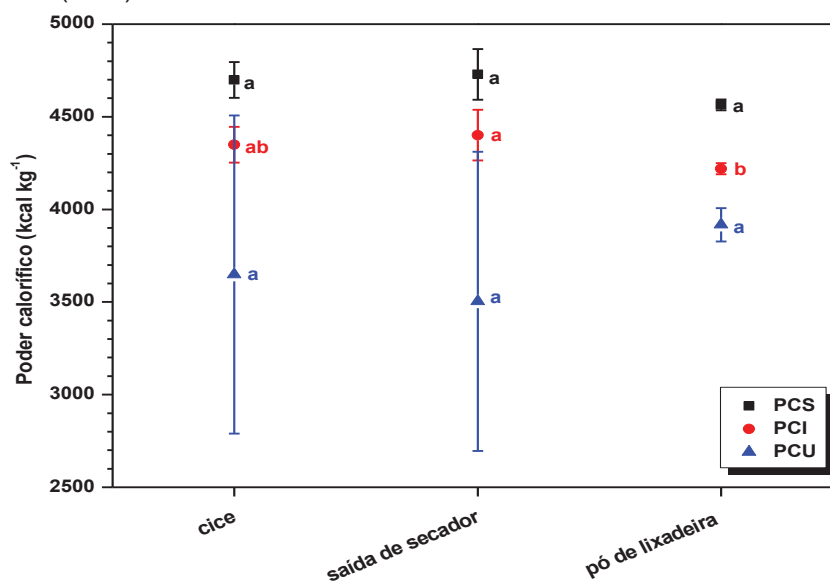


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

Como pode ser observado, o menor poder calorífico superior foi determinado para a amostra casca de varredura, sendo as demais iguais estatisticamente. Isso pode ser justificado pelo fato de ter apresentado maior teor de cinzas na análise química imediata. Como as amostras obtiveram aproximadamente o mesmo teor de hidrogênio, o mesmo comportamento pode ser observado para o poder calorífico inferior. No entanto, essas diferenças se dissipam quando se trata do poder calorífico útil, que leva em consideração o teor de umidade das amostras, fazendo com que todas apresentassem resultado estatisticamente iguais para todas as amostras.

FIGURA 34 - VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDP

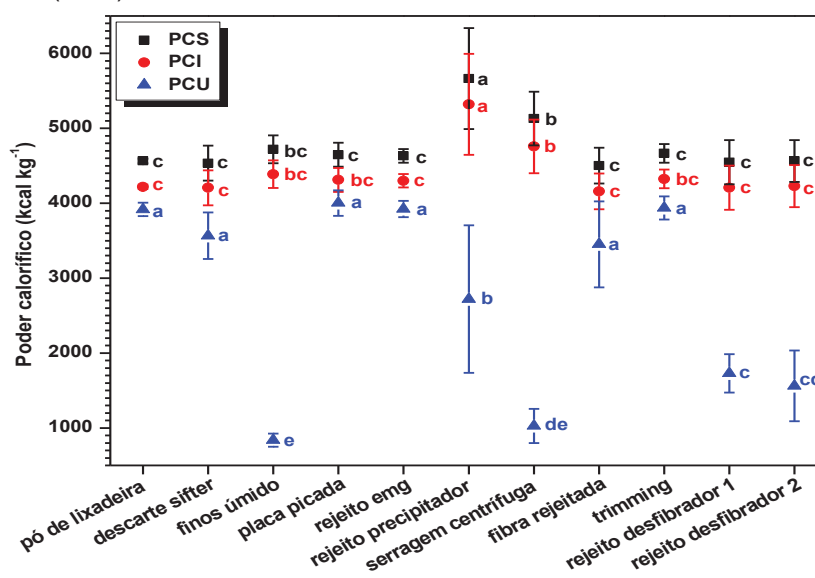


FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

Na etapa Processo MDP as biomassas residuais apresentaram comportamento estatisticamente iguais para poder calorífico superior e para o poder calorífico útil, isso porque no poder calorífico útil, a variação nas amostras pó de CICE e saída do secador se justificam pela variação no teor de umidade.

FIGURA 35 - VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PROCESSO MDF



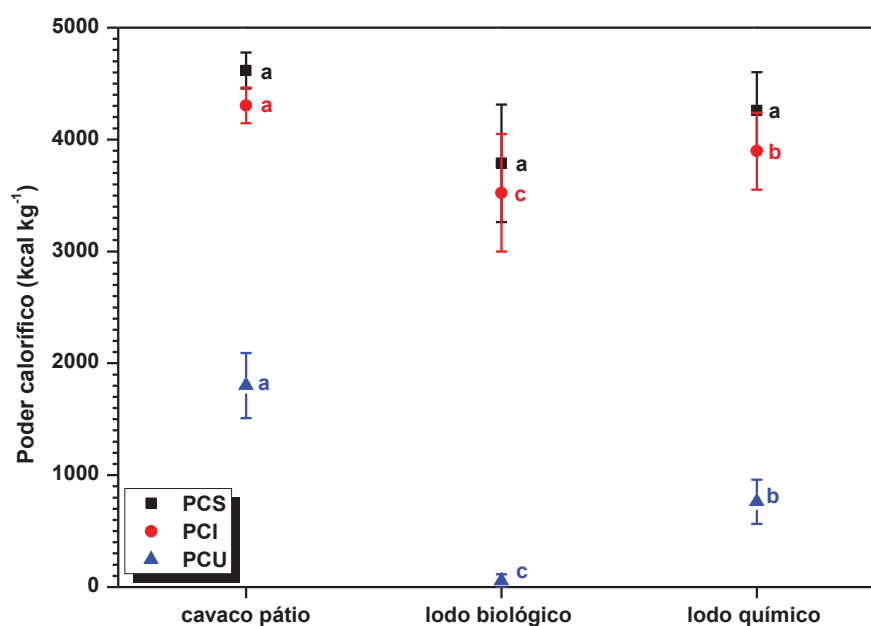
FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.



Para as biomassas residuais do processo MDF o maior poder calorífico superior foi determinado para a amostra rejeito do precipitador. Os menores valores de poder calorífico útil foram para finos úmido e serragem centrífuga, justificado pelo teor de umidade determinado.

FIGURA 36 - VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NO PÓS PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: As letras minúsculas dispostas nos gráficos representam o resultado do Teste de Tukey a 95% de significância.

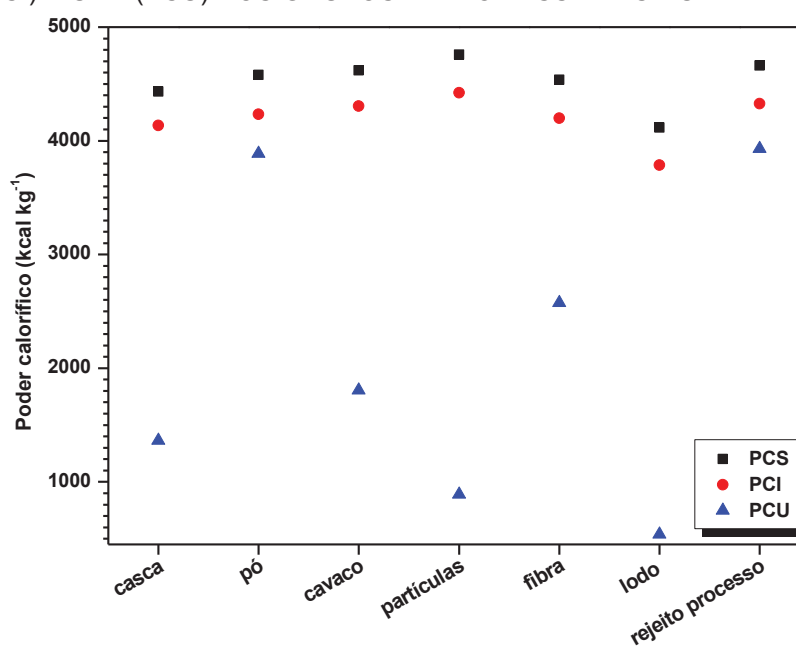
O poder calorífico superior das biomassas residuais do pós-processos foram iguais estatisticamente, exceto o lodo biológico. A amostra lodo biológico apresentou menores valores para o poder calorífico inferior e útil, provavelmente justificado pelo alto teor de cinzas e teor de umidade.

Conforme Mckendry (2002) o poder calorífico superior é o conteúdo total de energia liberado quando o combustível é queimado no ar, incluindo o calor latente contido no vapor de água representando a quantidade máxima de energia potencialmente recuperável de uma determinada fonte de biomassa. A quantidade real de energia recuperada irá variar com a tecnologia de conversão, assim como a forma dessa energia, ou seja, gás combustível, óleo, vapor, etc. Em termos práticos, o calor latente contido no vapor de água não pode ser usado efetivamente e o poder

calorífico útil é o valor apropriado a ser usado para determinar a energia disponível para uso posterior.

A FIGURA 37 apresenta os valores médios do poder calorífico dos grupos de biomassa residual formados.

FIGURA 37 - VALOR MÉDIO ESTIMADO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS), INFERIOR (PCI) E ÚTIL (PCU) DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL



FONTE: A autora (2019).

Como pode ser observado na FIGURA 37 o poder calorífico superior estimado ficou entre 4117 e 4757 kcal kg<sup>-1</sup>, sendo o valor máximo menor que o determinado individualmente, em função da participação de cada biomassa. O poder calorífico útil apresentou ligeiro aumento para o grupo lodos e redução no grupo partículas pelo mesmo motivo.

#### 4.2.1.5 Composição Química Elementar

A TABELA 2 apresenta os valores percentuais médios determinados para a análise elementar das biomassas residuais coletadas na indústria de painéis.

TABELA 2 - VALORES MÉDIOS DETERMINADOS NA ANÁLISE ELEMENTAR DAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

	AMOSTRA	C (%)	H (%)	N (%)	Cl (%)	S (%)	O (%)
Pré-processo	Casca silo biomassa	47,32 ± 0,3	5,53 ± 0,2	0,87 ± 0,1	0,28 ± 0,1	0,05 ± 0,005	45,94 ± 0,7
	Casca sem mistura	52,47 ± 0,6	5,09 ± 0,5	0,56 ± 0,1	0,35 ± 0,1	0,05 ± 0,001	41,48 ± 5,6
	Casca varredura	42,43 ± 1,5	4,98 ± 0,8	0,82 ± 0,2	0,32 ± 0,1	0,07 ± 0,01	45,57 ± 0,2
	Casca moinho martelo	42,71 ± 0,9	5,28 ± 0,1	0,70 ± 0,1	0,38 ± 0,1	0,05 ± 0,00	50,88 ± 0,9
	Finos do crivo	47,06 ± 0,1	6,06 ± 0,4	0,22 ± 0,1	0,27 ± 0,1	0,03 ± 0,01	46,37 ± 0,4
	Over crivo	47,06 ± 1,3	6,24 ± 0,3	0,18 ± 0,1	0,25 ± 0,2	0,02 ± 0,01	46,24 ± 0,7
Processo MDF	Saída de secador	49,87 ± 0,2	6,09 ± 0,2	0,50 ± 0,1	0,30 ± 0,1	0,04 ± 0,01	43,19 ± 0,2
	Pó de CICE	47,69 ± 1,1	6,48 ± 0,1	0,70 ± 0,4	0,35 ± 0,1	0,05 ± 0,01	44,74 ± 0,6
	Pó de lixadeira	46,29 ± 0,7	6,38 ± 0,1	3,39 ± 0,1	0,26 ± 0,1	0,02 ± 0,00	43,66 ± 0,7
Processo MDF	Finos úmido	49,15 ± 2,2	6,17 ± 0,4	0,49 ± 0,2	0,30 ± 0,08	0,05 ± 0,00	43,83 ± 2,9
	Serragem centrífuga	54,98 ± 0,2	6,89 ± 0,04	0,81 ± 0,03	0,23 ± 0,01	0,06 ± 0,01	37,03 ± 0,1
	Rejeito desfibrador planta 1	48,14 ± 0,2	6,32 ± 0,04	0,31 ± 0,1	0,31 ± 0,21	0,02 ± 0,00	44,90 ± 0,2
	Rejeito desfibrador planta 2	48,17 ± 0,5	6,22 ± 0,1	0,43 ± 0,1	0,16 ± 0,02	0,02 ± 0,00	45,00 ± 0,5
	Rejeito precipitador	51,27 ± 6,5	6,40 ± 0,7	1,82 ± 0,5	0,47 ± 0,15	0,49 ± 0,39	39,55 ± 6,2
	Sifter	44,35 ± 0,8	6,09 ± 0,2	4,01 ± 0,9	0,38 ± 0,16	0,04 ± 0,02	45,14 ± 0,5
	Fibra rejeitada	46,19 ± 0,1	6,38 ± 0,1	2,64 ± 0,3	0,28 ± 0,12	0,03 ± 0,01	44,48 ± 0,4
	Trimming	45,77 ± 0,7	6,32 ± 0,02	3,50 ± 0,5	0,29 ± 0,04	0,03 ± 0,01	44,10 ± 0,5
	Placa picada	45,36 ± 1,6	6,23 ± 0,1	2,53 ± 0,3	0,24 ± 0,07	0,02 ± 0,00	45,63 ± 2,1
	Rejeito emg	45,58 ± 0,6	6,15 ± 0,1	2,50 ± 0,2	0,25 ± 0,02	0,02 ± 0,00	45,50 ± 0,9
Pós-processo	Cavaco	44,14 ± 0,7	5,79 ± 0,1	0,37 ± 0,1	0,24 ± 0,03	0,05 ± 0,00	49,41 ± 0,6
	Lodo biológico	50,80 ± 3,3	4,89 ± 1,3	5,33 ± 0,6	0,70 ± 0,17	0,41 ± 0,55	37,86 ± 4,6
	Lodo químico	46,34 ± 2,1	6,71 ± 0,03	2,63 ± 0,4	0,45 ± 0,2	0,26 ± 0,01	43,60 ± 1,5

FONTE: A autora (2019).

A composição elementar de um combustível de biomassa é importante e geralmente apresenta seis elementos principais C, H, N, S, Cl e O. As porcentagens de N, S e Cl dão uma ideia do impacto da utilização de um combustível de biomassa, enquanto as concentrações de C, H e O permitem a proporção teórica de combustão em sistemas de termo conversão. Constitui base para análise de processos de combustão, como cálculo de volumes de ar, gases e entalpia, determinação do poder calorífico do combustível (VARGAS-MORENO *et al.*, 2012; CORTEZ *et al.*, 2011).

Delucis *et al.* (2018) determinaram teor de hidrogênio para cascas de *Pinus elliotti* em 5,46% valor próximo ao que foi determinado nesse trabalho.

O carbono e o hidrogênio são os principais responsáveis da quota combustível da biomassa através da sua oxidação para formar CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O respectivamente. O oxigênio contido na estrutura da planta fornece parte do oxidante necessário para que a combustão aconteça. As concentrações de nitrogênio e enxofre na biomassa

governam as emissões de alguns gases poluentes durante a combustão da biomassa (SARACHE, 2014).

Pode ser observado que a presença de S e Cl foi baixa em relação aos demais elementos, sendo a presença desses dois elementos relacionada à chuva ácida, corrosão e problemas de sinterização (FERNANDES, 2015).

Dos valores observados para as amostras do processo MDP apenas o pó de lixadeira apresentou valor mais alto para o nitrogênio. Esse fato pode ser explicado pelo fato de o pó de lixadeira ser originário do acabamento dos painéis, onde houve aplicação de resina que é rica em nitrogênio na sua composição.

Pode ser observado nas amostras do processo MDF que ocorreu um aumento no teor de nitrogênio. Isso pode ser justificado pelo fato de que as amostras que apresentaram esse aumento significativo, receberam resina durante o processo produtivo. A resina aplicada no processo de fabricação do MDF é rica em nitrogênio conforme observado por Gomes *et al.* (2016); Mayer *et al.* (2018).

Como pode ser observado nas amostras do pós-processo, as maiores diferenças nos valores percentuais médios foram para o teor de nitrogênio das amostras dos lodos, fato que pode ser justificado em função do processo de neutralização dos lodos.

A TABELA 3 apresenta os valores médios da análise elementar dos grupos de biomassa residual formados.

TABELA 3 - VALORES MÉDIOS ESTIMADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS

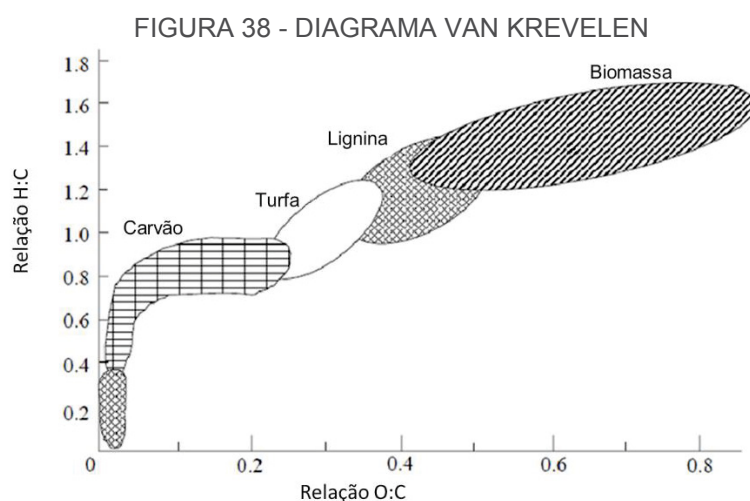
<b>Grupos</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>Cl (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>O (%)</b>
Casca	47,14	5,49	0,85	0,29	0,06	46,17
Pó	46,47	6,39	3,10	0,27	0,02	43,76
Cavaco	44,16	5,80	0,37	0,24	0,05	49,39
Partículas	49,51	6,23	0,50	0,29	0,05	43,43
Fibra	46,80	6,27	1,78	0,28	0,03	44,85
Lodo	47,68	6,17	3,44	0,52	0,31	41,88
Rejeitos do processo produtivo	45,69	6,22	2,79	0,27	0,03	45,02

FONTE: A autora (2019).

Da mesma forma como verificado anteriormente, biomassas originárias de pontos onde receberam resina apresentaram teores de nitrogênio superior aos demais grupos. De acordo com Reis *et al.* (2012), a utilização da madeira como biocombustível para fornecimento energético deve conter menores quantidades de

oxigênio e elevados teores de carbono e hidrogênio, pois estes componentes elementares apresentam correlações diretas com o poder calorífico da biomassa vegetal, fato esse observado tanto nas composições quanto nas biomassas antes da mistura.

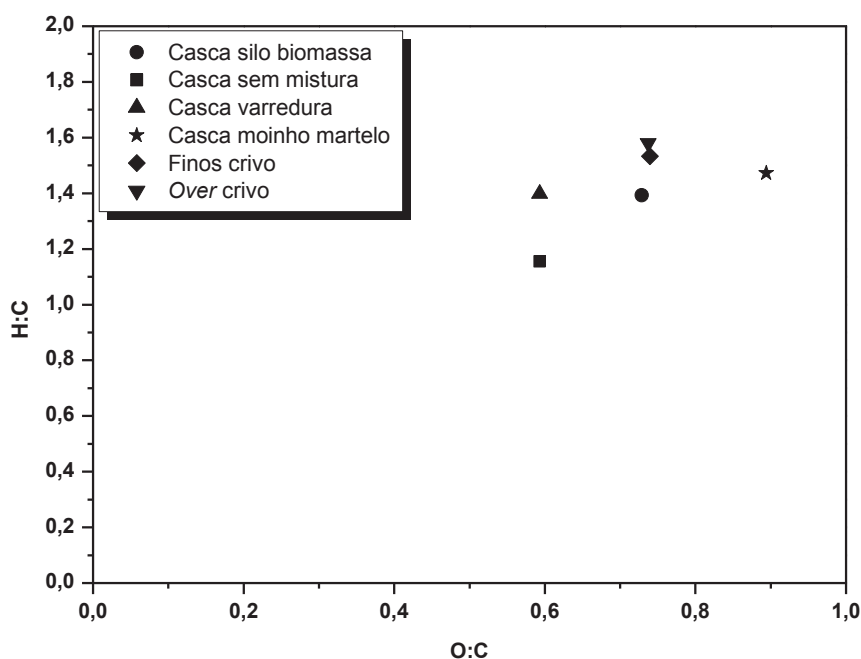
Com base na análise elementar é possível determinar a razão atômica de O:C e H:C das biomassas e segundo Mckendry (2002) o significado dessas razões nos combustíveis sólidos pode ser ilustrado usando um diagrama de Van Krevelen (FIGURA 38). O diagrama de Van Krevelen é um método gráfico-estatístico inicialmente utilizado para diferenciar tipos de querogênios (parte insolúvel da matéria orgânica modificada por ações geológicas). Querogênios do tipo I são ricos em hidrogênios e pobres em oxigênio, correspondendo à melhor composição de matéria orgânica para a geração de hidrocarbonetos líquidos e gasosos, produzindo bons óleos. O tipo II é menos rico em hidrogênio do que o I, mas é considerado adequado para a formação de grandes acumulações de hidrocarbonetos. Querogênios do tipo III são ricos em oxigênio e pobres em hidrogênio sendo fontes de carvão mineral e gás. O querogênio do tipo IV não possui potencial para a geração de óleo ou gás, e é constituído por matéria orgânica oxidada (PGT, 2010; Coelho *et al.*, 2014).



FONTE: Adaptado de Glazoff (2012).

AS FIGURAS 39 a 42 apresentam os resultados da razão H:C e O:C para as biomassas residuais coletadas na indústria de painéis no Paraná.

FIGURA 39 - RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PRÉ PROCESSO

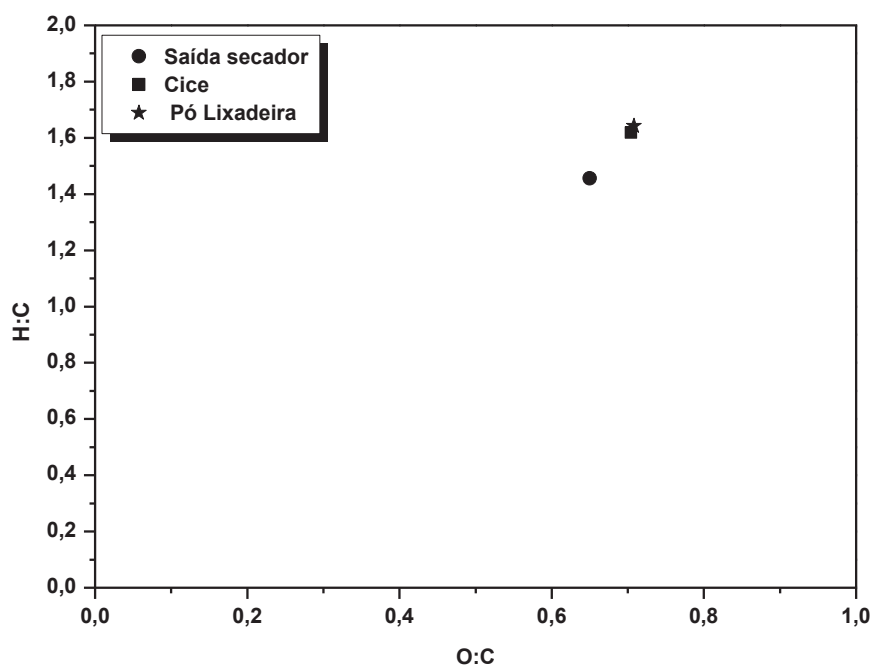


FONTE: A autora (2019).

Segundo Protásio *et al.* (2011), baixos valores de hidrogênio na composição da madeira resultam em uma alta relação H:C e pequenos acréscimos no teor de hidrogênio promovem elevado ganho no valor calórico dos combustíveis de biomassa. Esses autores (*ibidem*) encontraram por meio da análise de regressão linear simples que a cada 1% de acréscimo no teor de hidrogênio ocorre um aumento de aproximadamente 515 kcal kg<sup>-1</sup> no poder calorífico superior da biomassa vegetal. Os mesmos autores (*ibidem*) observaram que a cada 1% de acréscimo no teor de carbono ocorre um aumento de apenas 64,14 kcal kg<sup>-1</sup> no valor calórico da biomassa.

Como pode ser observado na FIGURA 39 as biomassas da etapa do pré processo apresentaram mesmo comportamento do diagrama de Van Krevelen.

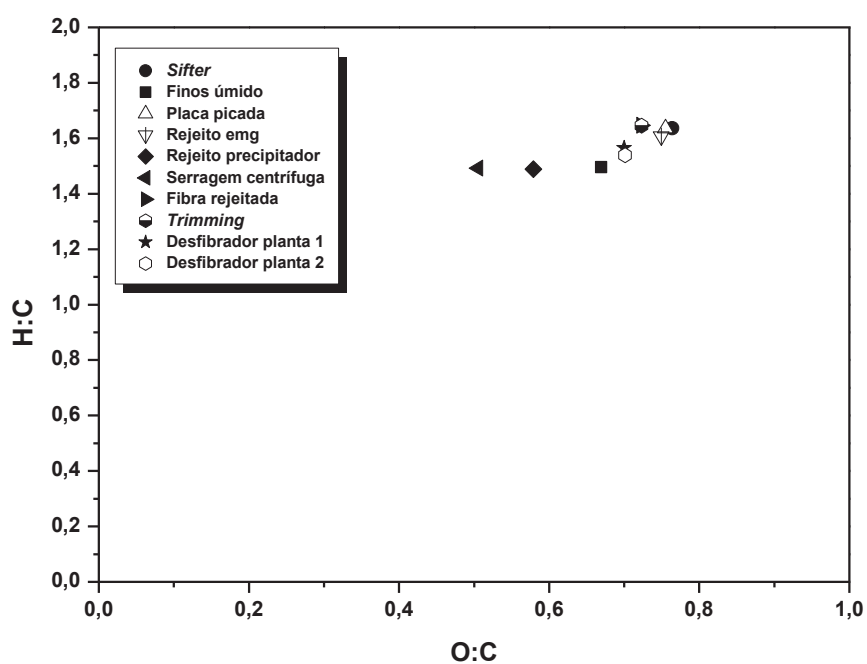
FIGURA 40 - RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PROCESSO MDP



FONTE: A autora (2019).

Da mesma forma as biomassas da etapa do processo MDP apresentaram disposição no gráfico idêntica ao que o gráfico de referência para biomassas (FIGURA 38).

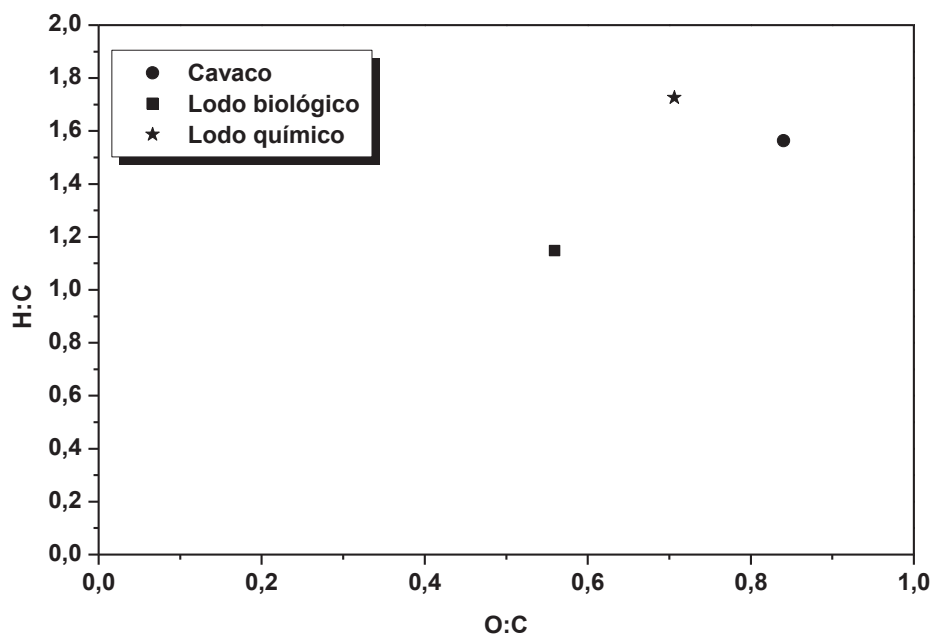
FIGURA 41 - RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PROCESSO MDF



FONTE: A autora (2019).

As biomassas da etapa no processo MDF se apresentam mais distribuídas no gráfico (FIGURA 41), mesmo assim, com na mesma área de biomassas determinado por Van Krevelen.

FIGURA 42 - RAZÃO ATÔMICA H:C E O:C DAS BIOMASSAS COLETADAS NO PÓS PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

As biomassas do pós processo não apresentou comportamento diferente das demais biomassas nas outras etapas, concordando com o que apresentou o gráfico de referência (FIGURA 38).

Pode ser observado nas distintas biomassas residuais das etapas do processo produtivo de painéis, que a relação H:C e O:C apresentou resultados similares aos verificados no diagrama de Van Krevelen (Figura 38).

#### 4.3 EMISSÕES DE GASES

A TABELA 4 apresenta a estimativa das emissões atmosféricas para as biomassas na indústria de painéis no Paraná, seguindo a metodologia adotada por USEPA (1995, 2001) e complementada pela CETESB (2015) e também de CO<sub>2</sub> pelo IPCC.



TABELA 4 - ESTIMATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PELAS BIOMASSAS RESIDUAIS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS NO PARANÁ

Biomassa residual	USEPA E CETESB				IPCC	
	MP (ton ano <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (ton ano <sup>-1</sup> )	SO <sub>x</sub> (ton ano <sup>-1</sup> )	CO (ton ano <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (ton ano <sup>-1</sup> )	
Pré processo	Casca sem mistura	5.183	1.242	232	5.548	2.968
	Casca de varredura	5.183	1.242	232	5.548	2.602
	Casca do silo de biomassa	155.497	37.260	6.955	166.426	87.070
	Casca antes do moinho de martelo	6.911	1.656	309	7.397	3.493
	Over do crivo	1.790	429	80	1.916	997
	Finos do crivo	7.162	1.716	320	7.665	3.988
Processo MDP	Pó de CICE	5.959	1.428	267	6.378	3.363
	Saída secador	596	143	27	638	352
	Pó lixadeira	53.036	12.708	2.372	56.764	29.052
Processo MDF	Finos úmido	69.537	16.662	3.110	74.424	40.442
	Serragem centrífuga	7.726	1.851	346	8.269	5.027
	Placa picada	4.664	1.118	209	4.992	2.503
	Rejeito EMG	11.660	2.794	522	12.480	6.289
	<i>Trimming</i>	6.996	1.676	313	7.488	3.789
	<i>Sifter</i>	1.503	360	67	1.609	789
	Silo fibra rejeitada	2.254	540	101	2.413	1.232
	Rejeito desfibrador planta 1	1.879	450	84	2.011	1.070
	Rejeito desfibrador planta 2	1.879	450	84	2.011	1.071
	Rejeito do precipitador	387	93	17	415	235
Pós processo	Cavaco	260.709	62.470	11.661	279.034	136.172
	Lodo biológico	8.683	2.080	388	9.293	5.219
	Lodo químico	20.259	4.854	906	21.683	11.109

FONTE: A autora (2019).

Como pode ser observado na TABELA 4, as biomassas que apresentam as maiores estimativas de material particulado (MP) foram cavaco, seguido de casca do silo de biomassa, finos úmidos e pó de lixadeira. O mesmo comportamento foi observado para as emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>.

Os principais gases associados ao efeito estufa são o CO<sub>2</sub>, o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O, que, em termos de CO<sub>2</sub>-equivalente, são responsáveis por quase 99% dos gases

antropogênicos de efeito estufa emitidos. O material de biomassa quando queimado libera variedades extensas de gases, como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, compostos orgânicos voláteis e semivoláteis, aldeído, ácido orgânico e elementos inorgânicos e material particulado (YADAV; DEVI, 2018).

A utilização da biomassa para geração de energia irá gerar CO<sub>2</sub>. De acordo com a literatura, a queima da biomassa não contribui com nenhum novo dióxido de carbono para a atmosfera, porque o plantio da biomassa garante que o CO<sub>2</sub> seja absorvido e devolvido para um novo ciclo de crescimento (BRIANEZI *et al.*, 2014). Esta opção faz sentido se considerar uma área cultivada onde estão crescendo continuamente plantas que virão a produzir a energia de que a sociedade necessita, fazendo com que o balanço de CO<sub>2</sub> seja continuamente nulo, não afetando o efeito estufa. No entanto, precisa ser levado em consideração o intervalo de tempo entre a liberação de CO<sub>2</sub> na queima de combustíveis e o tempo de absorção pela biomassa, além da necessidade de haver necessidade de um programa de substituição de plantio (MCKENDRY, 2002; LORA; SALOMON, 2004).

Com relação a emissão de NO<sub>x</sub>, Martins; Ferreira (2010) afirmaram que o NO<sub>x</sub> emitido durante o processo de combustão depende da composição do combustível, do modo de operação e do projeto dos queimadores e da câmara de combustão. Cada um desses parâmetros é significativo em relação à concentração final de NO<sub>x</sub> emitido. É importante controlar as emissões de NO<sub>x</sub> uma vez que ele contribui para a chuva ácida, reage com os compostos orgânicos voláteis formando ozônio, que é prejudicial à saúde humana.

A emissão de CO<sub>2</sub> é imediata quando ocorre a combustão, e embora alguns autores considerem nulo o efeito dessa emissão no aquecimento global, faz-se necessário levar em consideração o intervalo de tempo entre a emissão de CO<sub>2</sub> e a total absorção pela biomassa dessa emissão (MCKENDRY, 2002).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS

##### 4.4.1 Espectroscopia por Fluorescência de Raios X

A TABELA 5 apresentam os resultados obtidos dos percentuais dos principais óxidos encontrados nas cinzas das biomassas estudadas.

TABELA 5 - ANÁLISE QUÍMICA DE CINZAS POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X NAS BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

	<b>Biomassa residual</b>	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>MgO (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>CaO (%)</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	<b>Na<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	<b>MnO (%)</b>
Pré processo	Casca silo biomassa	71,2	14,7	5,6	1,4	1,0	2,7	1,7	0,9	0,1	0,3	0,2
	Casca sem mistura	59,7	19,1	10,4	1,9	2,1	2,9	2,4	0,8	0,2	0,3	0,2
	Casca varredura	63,6	15,9	10,0	4,6	2,2	1,2	1,0	0,4	0,3	0,2	0,2
	Casca antes moinho martelo	62,8	18,8	7,7	1,8	1,2	4,0	1,8	1,0	0,2	0,2	0,3
	Finos do crivo	39,8	9,3	7,5	7,0	1,0	10,2	15,5	4,7	0,5	2,0	2,1
	Over do crivo	8,3	2,4	3,8	4,1	0,5	26,2	39,2	4,7	0,1	2,6	6,4
Processo MDP	Pó de CICE	39,3	19,1	11,9	4,1	1,6	7,6	9,6	2,9	0,4	1,6	1,7
	Saída secador	23,2	10,1	7,8	7,8	1,0	14,8	21,1	4,0	0,4	4,3	4,7
	Pó lixadeira	24,3	14,4	2,5	7,0	0,5	14,1	22,3	2,9	1,2	2,6	7,1
	Finos úmido	59,7	12,4	6,6	7,6	0,8	4,4	4,0	1,8	1,0	0,6	0,6
	<i>Sifter</i>	8,7	3,8	8,6	3,1	1,1	13,8	40,6	3,8	0,4	8,7	5,3
Processo MDF	Fibra rejeitada	26,0	6,0	29,2	2,6	1,6	7,6	11,8	2,1	1,0	2,3	2,4
	Rejeito desfibrador planta 1	34,3	6,6	11,8	2,7	1,5	14,4	18,8	2,9	0,1	1,3	4,3
	Rejeito desfibrador planta 3	23,0	4,9	13,4	3,1	1,1	6,7	26,3	3,4	0,1	10,5	5,7
	Serragem centrífuga	73,3	7,6	4,8	2,6	1,2	3,0	2,8	3,1	0,4	0,4	0,4
	Rejeito precipitador	31,7	20,9	10,5	3,5	1,2	7,8	9,1	2,9	1,4	8,7	1,2
	Placa picada	11,6	7,0	5,2	10,4	0,5	17,4	29,9	5,1	1,4	4,0	6,2
	Rejeito emg	10,0	5,9	4,3	10,3	0,5	19,8	30,7	5,5	1,7	4,4	5,4
	<i>Trimming</i>	7,5	3,1	7,4	3,4	0,7	20,4	34,0	3,6	1,1	9,4	7,6
Pós processo	Lodo biológico	2,2	12,7	0,4	0,5	0,0	0,9	73,1	7,4	0,3	1,5	0,1
	Lodo químico	10,5	28,1	2,3	6,8	0,1	0,5	46,0	3,0	0,2	0,5	1,3
	Cavaco	10,4	4,2	2,4	9,4	0,4	16,5	45,8	4,4	0,6	1,5	2,2
	Cinzas planta 3	69,8	13,3	6,5	1,7	1,2	2,4	3,2	0,8	0,3	0,2	0,3
	Cinzas planta 1	34,9	14,6	6,1	4,8	0,9	7,6	26,2	2,7	0,5	0,1	1,2
	Cinzas planta 2	68,3	14,6	8,5	1,9	1,9	2,3	1,3	0,5	0,3	0,1	0,2

FONTE: A autora (2019).

NOTA: Dados normalizados para 100%.

A determinação dos principais óxidos presentes nas cinzas da biomassa utilizada pode ser um parâmetro para utilização ou não do material, uma vez que influencia na corrosão e deposição de cinzas nos trocadores de calor e outras superfícies no combustor (XING *et al.*, 2016). Estudos mostram que cinzas com maior

quantidade de  $\text{SiO}_2$  podem aumentar a erosão nas superfícies de convecção da caldeira e causar escória nas superfícies radiantes (PRNOBIS, 2005; PRNOBIS, 2006; KALISZ *et al.*, 2008). Segundo Pelanda *et al.* (2015), o efeito das cinzas de biomassa pode gerar escórias e incrustações, inviabilizando a utilização da biomassa e gerando aumento significativo dos custos de manutenção nos equipamentos.

Os elementos presentes nas cinzas da biomassa podem ser da própria biomassa ou pode ser adquirida durante a colheita ou o transporte da mesma.

Vassilev (2014) afirma que maiores concentrações de Ca, Al e Ti e menores teores de K, Si, P, S, Fe, Na e Mg, normalmente contribuem para o aumento na temperatura de fusão das cinzas de biomassa.

Pode-se observar que os óxidos com maiores percentuais são  $\text{SiO}_2$ , CaO e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nas biomassas residuais coletadas.

O teor de metal alcalino da biomassa, isto é, Na, K, Mg, P e Ca, é especialmente importante para quaisquer processos de conversão termoquímicos. A reação de metais alcalinos com sílica presente nas cinzas produz uma fase líquida pegajosa e móvel, que pode levar a bloqueios de vias aéreas no forno e na caldeira. Deve-se notar que, embora o teor de sílica intrínseca de uma fonte de biomassa possa ser baixo, a contaminação com o solo introduzida durante a colheita pode aumentar significativamente o teor total de sílica. Dessa forma, embora o teor de sílica intrínseca no material não seja motivo de preocupação, o aumento do teor total de sílica pode levar a dificuldades operacionais (MCKENDRY, 2002).

A TABELA 6 apresenta a estimativa dos percentuais dos principais óxidos presentes nos grupos de biomassa formados.

TABELA 6 - ESTIMATIVA DOS PERCENTUAIS DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS PRESENTES NOS GRUPOS DE BIOMASSA FORMADOS

Grupo	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	MnO (%)
Casca	70,3	15,0	5,98	1,56	1,10	2,7	1,74	0,90	0,12	0,30	0,21
Pó	25,8	14,9	3,48	6,68	0,63	13,5	21,1	2,92	1,16	2,51	6,50
Cavaco	10,4	4,2	2,45	9,36	0,39	16,5	45,8	4,38	0,64	1,55	2,22
Partículas	59,2	11,7	6,49	7,08	0,87	4,81	4,91	2,18	0,91	0,70	0,71
Fibra	23,9	5,4	16,76	2,88	1,33	10,3	22,9	2,96	0,42	5,39	4,30
Lodo	8,0	23,5	1,70	4,91	0,08	0,61	54,1	4,30	0,25	0,77	0,96
Rejeitos do processo	9,9	5,6	5,50	8,15	0,56	19,3	31,1	4,81	1,46	5,89	6,11

FONTE: A autora (2019).

Conforme pode ser observado os maiores teores dióxido de silício continuou sendo para a casca, seguido das partículas e pó. O segundo componente com maior percentual foi o Óxido de Cálcio tendo o lodo apresentado o maior percentual seguido do cavaco e fibra sendo que o aumento na concentração de óxido de Cálcio diminui a temperatura de fusão (LIU *et al.*, 2013).

#### 4.4.2 Propensão à formação de Escória, Incrustação e Álcali

A TABELA 7 apresenta os índices para formação de escória, incrustação, álcali e sinterização da biomassas residuais coletadas.

TABELA 7 - ÍNDICE DE FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, ÁLCALI E SINTERIZAÇÃO NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

(Continua)

Biomassa residual	Escória	Incrustação	Álcalis	Sinterização	
Pré-processo	Casca silo biomassa	0,14 <sup>a</sup>	0,05 <sup>1</sup>	1,34 <sup>***</sup>	1,1 <sup>◊</sup>
	Casca sem mistura	0,23 <sup>a</sup>	0,07 <sup>1</sup>	1,89 <sup>***</sup>	1,4 <sup>◊</sup>
	Casca varredura	0,22 <sup>a</sup>	0,14 <sup>1</sup>	2,66 <sup>***</sup>	3,7
	Casca antes moinho martelo	0,20 <sup>a</sup>	0,05 <sup>1</sup>	2,33 <sup>***</sup>	0,9 <sup>◊</sup>
	Finos do crivo	0,91 <sup>b</sup>	0,08 <sup>1</sup>	0,38 <sup>***</sup>	2,1
	Over do crivo	6,95 <sup>d</sup>	0,26 <sup>1</sup>	0,66 <sup>***</sup>	1,6 <sup>◊</sup>
	Processo MDP	Pó de CICE	0,61 <sup>b</sup>	0,08 <sup>1</sup>	0,67 <sup>***</sup>
Saída secador		1,63 <sup>c</sup>	0,11 <sup>1</sup>	0,45 <sup>***</sup>	1,9 <sup>◊</sup>
Pó lixadeira		1,28 <sup>c</sup>	0,08 <sup>1</sup>	0,26 <sup>**</sup>	1,9 <sup>◊</sup>

TABELA 7 - ÍNDICE DE FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, ÁLCALI E SINTERIZAÇÃO NAS BIOMASSAS RESIDUAIS COLETADAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

(Conclusão)

	Biomassa residual	Escória	Incrustação	Álcalis	Sinterização
Processo MDF	Rejeito desfibrador 2	1,84 <sup>d</sup>	0,27 <sup>1</sup>	0,11 <sup>*</sup>	4,3
	Fibra rejeitada	1,62 <sup>d</sup>	0,19 <sup>1</sup>	0,21 <sup>**</sup>	1,7 <sup>◇</sup>
	Placa picada	3,62 <sup>d</sup>	0,19 <sup>1</sup>	0,29 <sup>**</sup>	2,1
	Rejeito desfibrador 1	1,19 <sup>c</sup>	0,08 <sup>1</sup>	0,34 <sup>**</sup>	1,5 <sup>◇</sup>
	Finos úmido	0,35 <sup>a</sup>	0,06 <sup>1</sup>	0,95 <sup>***</sup>	2,1
	<i>Sifter</i>	5,18 <sup>d</sup>	0,37 <sup>1</sup>	0,78 <sup>***</sup>	3,1
	Serragem centrífuga	0,21 <sup>a</sup>	0,06 <sup>1</sup>	0,96 <sup>***</sup>	1,6 <sup>◇</sup>
	Rejeito precipitador	0,66 <sup>b</sup>	0,07 <sup>1</sup>	3,96 <sup>***</sup>	1,4 <sup>◇</sup>
	Rejeito emg	4,40 <sup>d</sup>	0,20 <sup>1</sup>	0,38 <sup>***</sup>	1,9 <sup>◇</sup>
	<i>Trimming</i>	6,16 <sup>d</sup>	0,29 <sup>1</sup>	0,43 <sup>***</sup>	1,7 <sup>◇</sup>
	Pós Process	Lodo biológico	5,53 <sup>d</sup>	4,65 <sup>2</sup>	1,92 <sup>***</sup>
Lodo químico		1,52 <sup>d</sup>	2,12 <sup>2</sup>	0,97 <sup>***</sup>	73,8
Cavaco		5,26 <sup>d</sup>	0,31 <sup>1</sup>	0,97 <sup>***</sup>	3,2

FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: Escória: a) baixa; b) média; c) alta; d) severa

Incrustação: 1) baixa; 2) alta; 3) extremamente alta

Álcali: \* sem propensão a incrustação e escoriação; \*\* propensão a escória e incrustação;

\*\*\* certa a ocorrência de escória e incrustação

Sinterização: ◇ apresenta risco de sinterização.

De acordo com Niu *et al.* (2010), o derretimento e a formação de escória da biomassa dependem das concentrações de K, Cl, S, Al e Si nas cinzas.

Para Fernandez (2016) a estimativa do grau de formação de escórias e incrustação pelas cinzas de biomassa é de importância crucial devido aos problemas de sinterização de cinzas.

A informação dos óxidos presentes nas cinzas é importante porque as cinzas contribuem para as emissões de poeira e problemas operacionais, como entupimento, escoriação e corrosão. Em aparelhos de pequena escala, eles podem perturbar o processo de combustão, reduzir a eficiência e levar a paradas indesejadas e níveis mais altos de compostos de uma combustão incompleta, incluindo monóxido de carbono (CO) e material particulado. As partículas consistem principalmente de elementos formadores de aerossol, como potássio (K) e cloro (Cl), bem como a corrosão e a incrustação de enxofre (S) (LIVINGSTON; BABCOCK, 2006; MUDGAL *et al.*, 2014).

Enxofre e silício, em combinação com álcali, levam a reações associadas a incrustações e escoriações em caldeiras. Silício e potássio afetam o comportamento de derretimento de cinzas em cultivos energéticos (FOURNEL *et al.*, 2015).

Com relação à formação de escória, todas as biomassas apresentaram essa tendência, variando apenas a intensidade. Com relação à formação de incrustação, apenas os lodos apresentaram alta tendência, como pode ser observado na TABELA 7. Com relação à formação de álcali, todas as biomassas apresentaram essa tendência, exceto o rejeito do desfibrador 2.

Das 22 biomassas avaliadas apenas 9 não apresentaram risco de sinterização, isso porque apresentam maiores teores de  $K_2O$  e  $Na_2O$  que têm temperatura de fusão mais altas que os teores de  $CaO$  e  $MgO$ .

A TABELA 8 apresenta os valores médios estimados para a tendência a formação de escória, incrustação, álcali e sinterização nos grupos de biomassa residual formados.

TABELA 8- VALORES MÉDIOS ESTIMADOS PARA A TENDÊNCIA DE FORMAÇÃO DE ESCÓRIA, INCRUSTAÇÃO, ÁLCALI E SINTERIZAÇÃO NOS GRUPOS DE BIOMASSA RESIDUAL FORMADOS

Grupos	Escória	Incrustação	Álcalis	Sinterização
Casca	0,15 <sup>a</sup>	0,05 <sup>1</sup>	1,43 <sup>***</sup>	1,2 <sup>◇</sup>
Pó	1,21 <sup>b</sup>	0,08 <sup>1</sup>	0,31 <sup>**</sup>	1,9 <sup>◇</sup>
Cavaco	5,27 <sup>c</sup>	0,31 <sup>1</sup>	0,96 <sup>***</sup>	3,2
Partículas	0,39 <sup>a</sup>	0,07 <sup>1</sup>	0,90 <sup>***</sup>	2,1
Fibra	2,28 <sup>c</sup>	0,22 <sup>1</sup>	0,33 <sup>**</sup>	2,4
Lodo	2,72 <sup>c</sup>	2,89 <sup>2</sup>	1,25 <sup>***</sup>	70,2
Rejeitos do processo	4,71 <sup>c</sup>	0,22 <sup>1</sup>	0,43 <sup>**</sup>	1,9 <sup>◇</sup>

FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: Escória: a) baixa; b) média; c) alta; d) severa

Incrustação: 1) baixa; 2) alta; 3) extremamente alta

Álcali: \* sem propensão a incrustação e escoriação; \*\* propensão a escória e incrustação; \*\*\* certa a ocorrência de escória e incrustação

Sinterização: ◇ apresenta risco de sinterização.

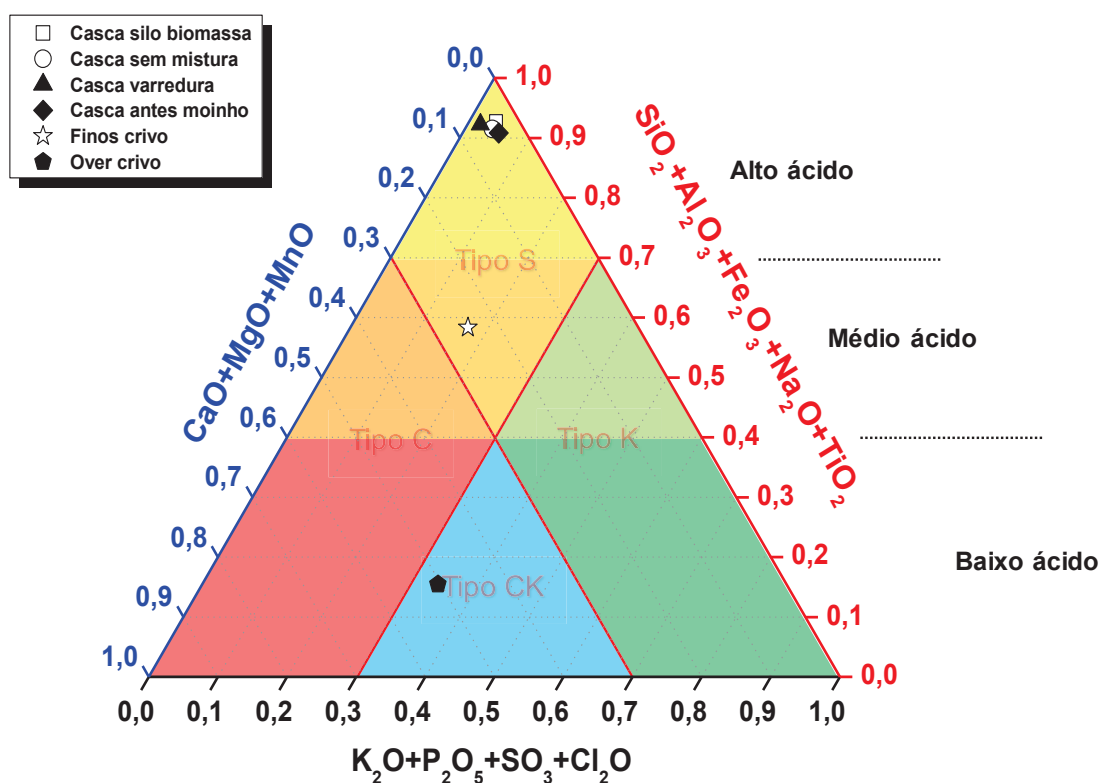
Como pode ser observado na TABELA 8 ao ocorrer a formação dos grupos, a casca e as partículas apresentam baixa tendência a formação de escória e a casca baixa tendência a formação de incrustação. No entanto, ao levar em consideração os

óxidos formadores de álcali, todos os grupos apresentam tendência a formação de escória e incrustação.

#### 4.4.3 Classificação das cinzas em função do óxido predominante

As FIGURAS 43 a 46 apresentam o sistema de classificação química das cinzas de biomassas em função do óxido predominante nas biomassas residuais por etapas e a FIGURA 47 apresenta o sistema de classificação química das cinzas nos grupos de biomassa residual formados.

FIGURA 43 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PRÉ-PROCESSO



FONTE: A autora (2019).

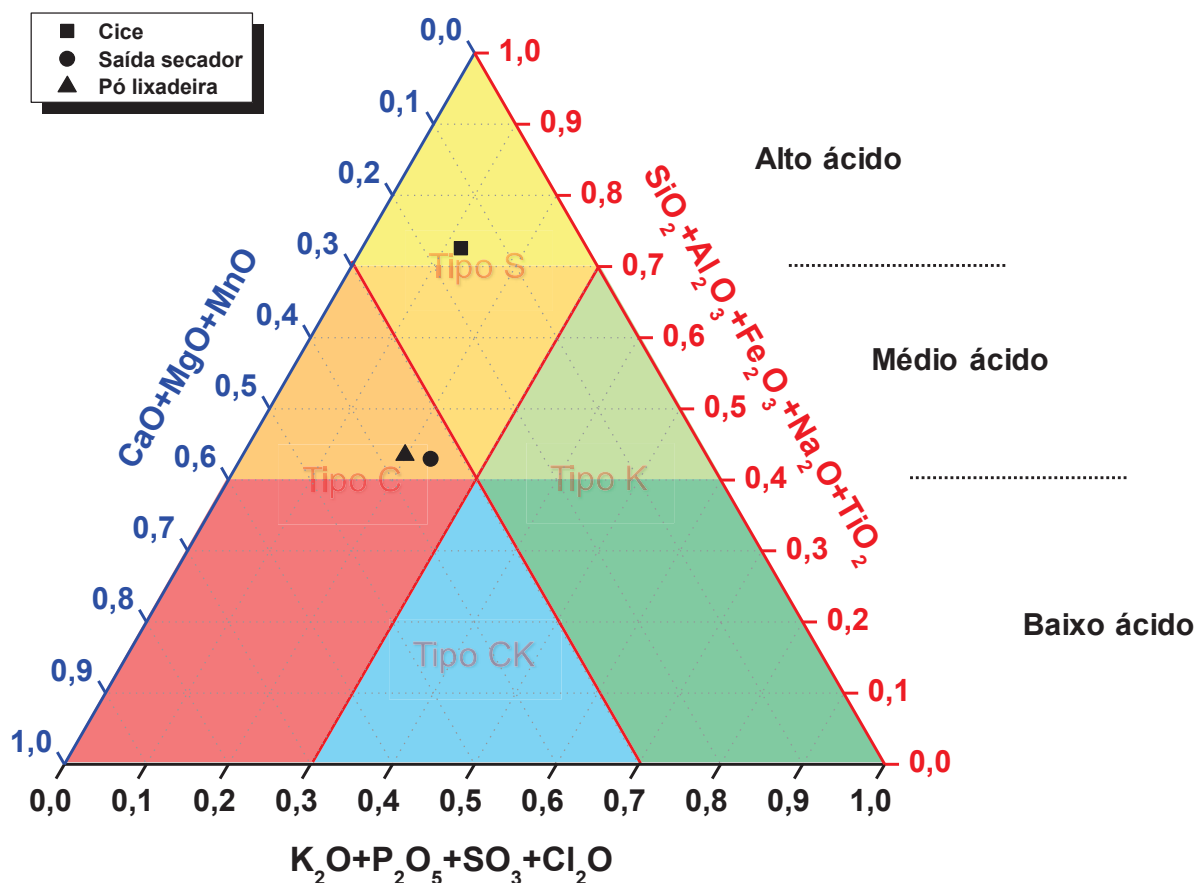
Segundo Vassilev *et al.* (2012), os minerais encontrados no tipo S, são geralmente estáveis, com altas temperaturas de fusão. Já os minerais encontrados nos tipos C, K e CK são normalmente instáveis, com baixa temperatura de fusão durante a queima da biomassa.

Como pode ser observado na FIGURA 43 as biomassas residuais do pré-processo apenas *over* do crivo apresentou características do Tipo CK, as demais



biomassas apresentaram características do Tipo S. As cascas apresentaram ponto de fusão das cinzas na deformação inicial acima de 1300 °C, conforme a FIGURA 43, enquanto finos e over do crivo apresentaram ponto de fusão das cinzas na deformação inicial na faixa de 1100 a 1300 °C.

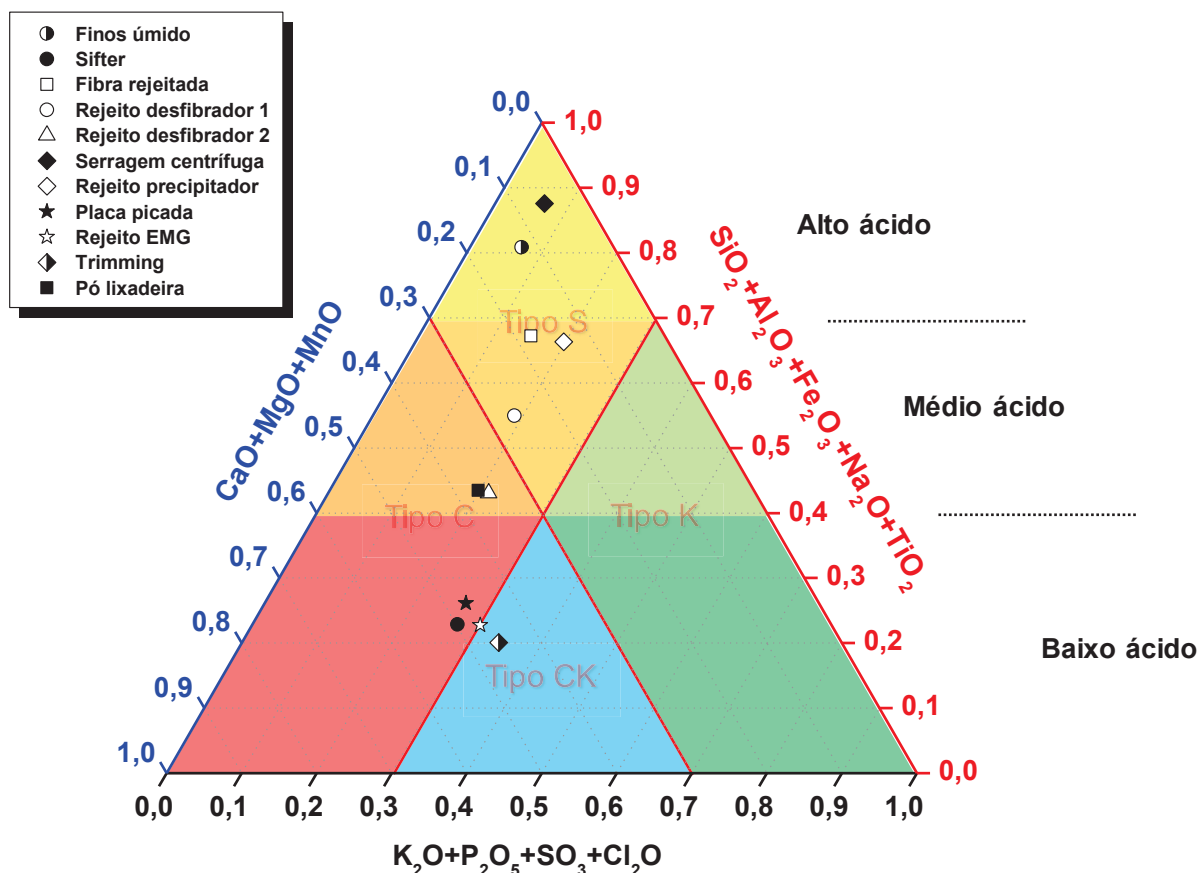
FIGURA 44 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PROCESSO MDP



FONTE: A autora (2019).

Nas biomassas do processo MDP, FIGURA 44, saída do secador e pó de CICE apresentaram características do Tipo C e apenas o pó de lixadeira apresentou características do Tipo S, sendo que as três biomassas apresentaram ponto de fusão das cinzas na deformação inicial na faixa de 1100 a 1300 °C.

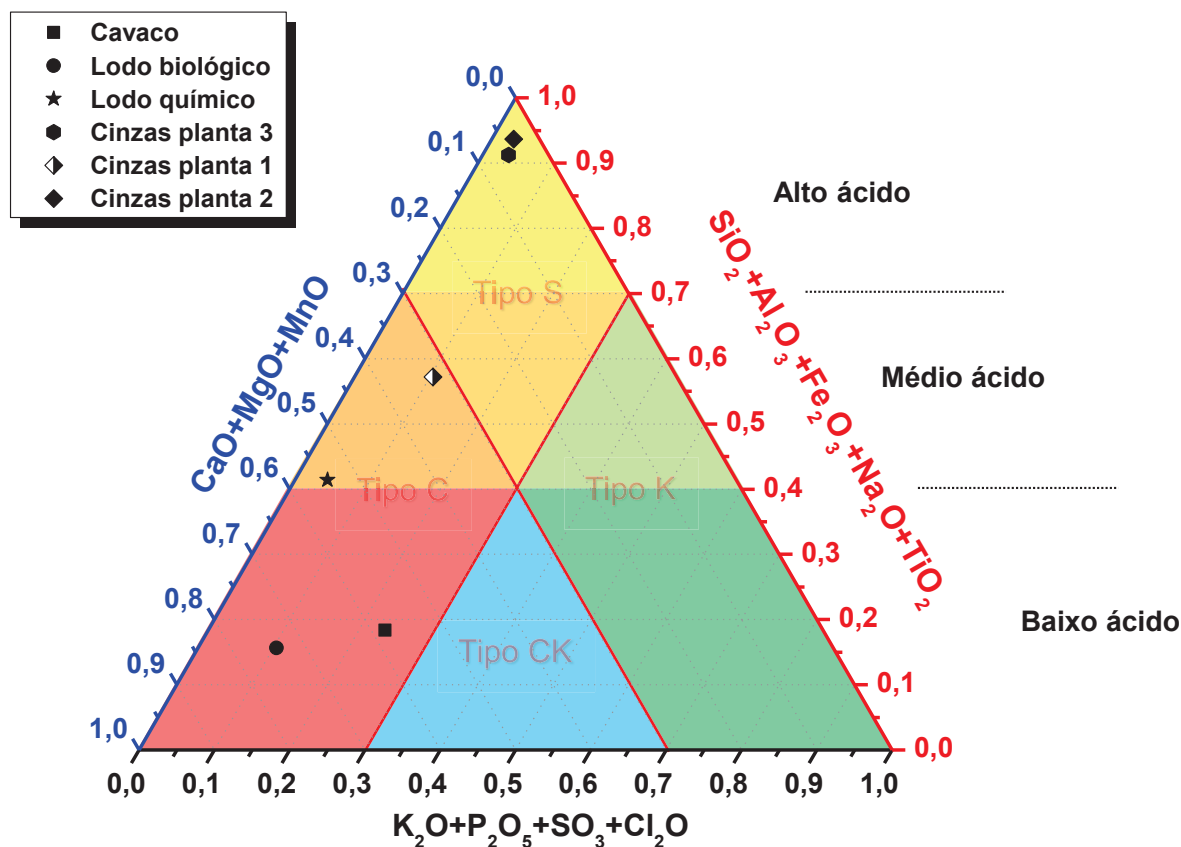
FIGURA 45 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PROCESSO MDF



FONTE: A autora (2019).

Na FIGURA 45 do processo MDF, a biomassa *trimming* se enquadrou no Tipo CK e a rejeito emg apresentou características entre o Tipo C e CK. Quatro biomassas apresentaram características do tipo C (pó de lixadeira, placa picada, rejeito desfibrador 2 e *sifter*). Já no tipo S, foram determinadas cinco biomassas (serragem centrífuga, finos úmidos, fibra rejeitada, rejeito desfibrador 1 e rejeito do precipitador). Apenas a serragem da centrífuga apresentou ponto de fusão das cinzas na deformação inicial acima de 1300 °C, sendo que as demais permaneceram na faixa de 1100 a 1300 °C.

FIGURA 46 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS ETAPA PÓS-PROCESSO

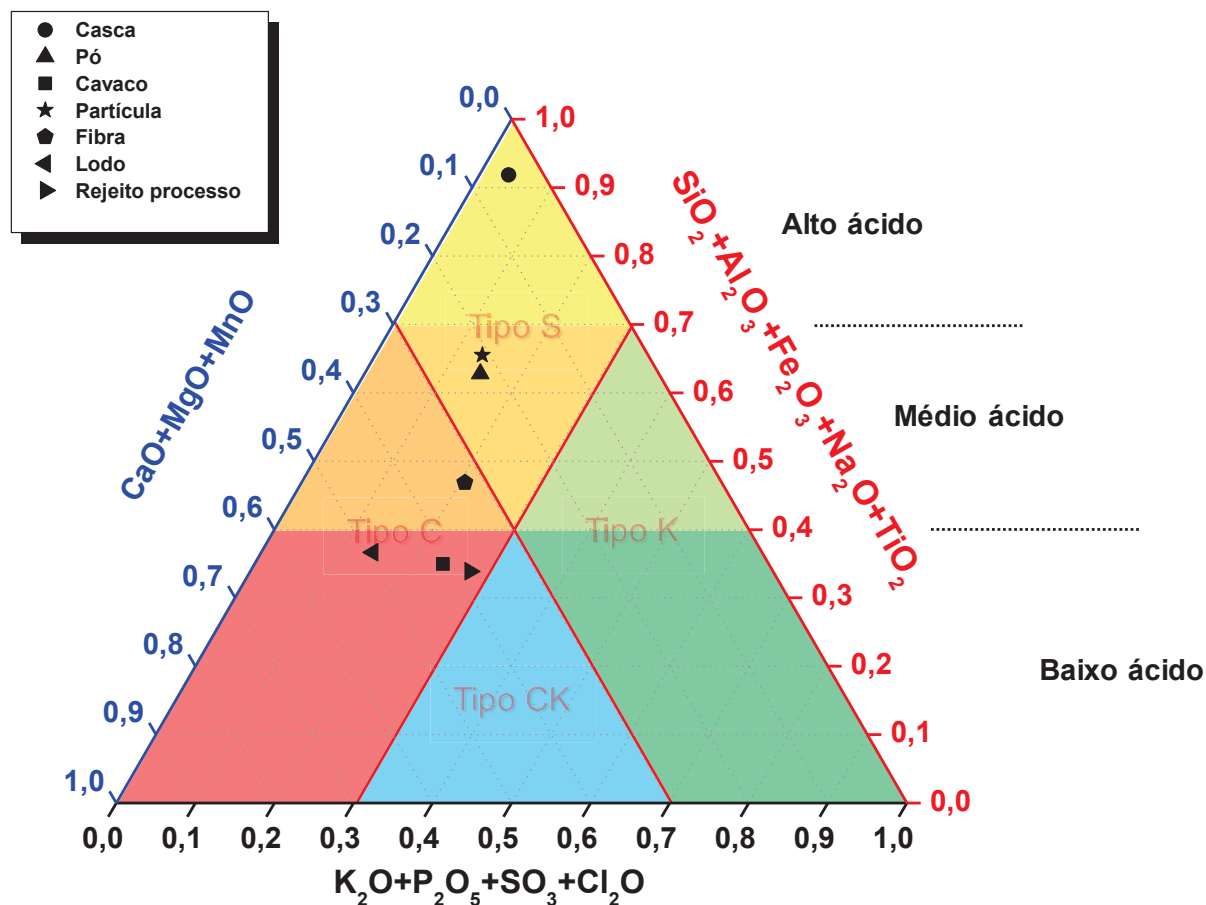


FONTE: A autora (2019).

Na FIGURA 46, referente às biomassas do pós-processo, pode ser observado que quatro biomassas apresentaram características do tipo C (lodo químico, cavaco, cinzas da planta 3, cinzas da planta 1). Outras quatro biomassas apresentaram características do tipo S (arrastador planta 3, cinzas planta 3, arrastador planta 2, cinza da planta 2). A biomassa arrastador da planta 1 apresentou características do Tipo S e C. Com relação ao ponto de fusão das cinzas na deformação inicial as amostras lodo biológico, arrastador da planta 2, arrastador da planta 3, cinzas da planta 2 e cinzas da planta 3 apresentaram ponto de fusão acima de 1300 °C. As demais biomassas apresentaram ponto de fusão na faixa de 1100 a 1300 °C.

Quando analisadas separadamente nenhuma biomassa apresentou características do tipo K.

FIGURA 47 - SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS CINZAS DE BIOMASSAS RESIDUAIS OBTIDAS NA INDÚSTRIA DE PAINÉIS NOS GRUPOS FORMADOS



FONTE: A autora (2019).

Quando as biomassas foram agrupadas, FIGURA 47, pode-se observar que seguem com proximidade o que foi apresentado individualmente, nenhuma biomassa apresentando características do tipo K e as poucas que se apresentaram no grupo CK migraram para o grupo C ou S, muito em função do percentual de participação no grupo.

Com relação à temperatura de fusão das cinzas na deformação inicial, apenas o grupo casca apresentou ponto de fusão acima de 1300 °C, sendo que os demais permaneceram na faixa de 110 a 1300 °C.

Segundo Domanski *et al.* (s.d), quanto mais elevada for a temperatura de combustão na fornalha, maior a capacidade de corrosão do gás produzido, isso porque alguns componentes das cinzas podem abaixar a temperatura de fusão das cinzas, acelerando a deposição delas nas grelhas. A temperatura e as condições da combustão devem ser adaptadas às variações na composição do combustível. Se o combustível favorecer grandes quantidades de cloros e sulfetos, sugere-se baixa a

temperatura de combustão para evitar o ponto de fusão das cinzas mais baixo e reduzir a taxa de deposição das cinzas.

#### 4.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA DA BIOMASSA

Em função do poder calorífico útil de cada material, foi estimada a energia a ser produzida por cada amostra em MWh conforme apresentado na TABELA 9.

TABELA 9 - QUANTIDADE ESTIMADA DE ENERGIA GERADA DE CADA BIOMASSA NO PERÍODO DE UM ANO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

PROCESSO	AMOSTRA	MWh ano <sup>-1</sup>	TOTAL
Pré-processo	Casca sem mistura	3.125	92.307
	Casca de varredura	2.980	
	Casca silo de biomassa	77.560	
	Casca moinho martelo	4.269	
	Over do crivo	1.056	
	Finos do crivo	3.317	
Processo MDP	Pó de CICE	8.159	86.901
	Saída secador	783	
	Pó lixadeira	77.959	
Processo MDF	Finos úmido	21.828	66.961
	Serragem centrífuga	2.977	
	Placa picada	7.006	
	Rejeito EMG	17.167	
	<i>Trimming</i>	10.340	
	<i>Sifter</i>	2.011	
	Fibra rejeitada	2.919	
	Rejeito desfibrador 1	1.218	
	Rejeito desfibrador 2	1.100	
	Rejeito precipitador	395	
Pós-processo	Cavaco (comprado de terceiros)	176.257	182.229
	Lodo biológico	177	
	Lodo químico	5.795	
<b>TOTAL GERAL</b>			<b>428.398</b>

FONTE: A autora (2019).

O cálculo da produção de energia por biomassa apresentado na TABELA 9, mostra que as biomassas residuais com maior percentual de participação no total consumido, foram as que apresentaram as maiores produções de energia, conforme esperado.

A TABELA 10 apresenta a produção de energia nos grupos formados.

TABELA 10 - QUANTIDADE ESTIMADA DE ENERGIA GERADA NOS GRUPOS NO PERÍODO DE UM ANO DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS

<b>GRUPO</b>	<b>MWh ano<sup>-1</sup></b>
Casca	88.285
Pó	86.153
Cavaco	177.685
Partículas	28.912
Fibras	7.259
Rejeito processo	4.783
Lodos	42.669
<b>Total</b>	<b>435.748</b>

Fonte: A autora (2019).

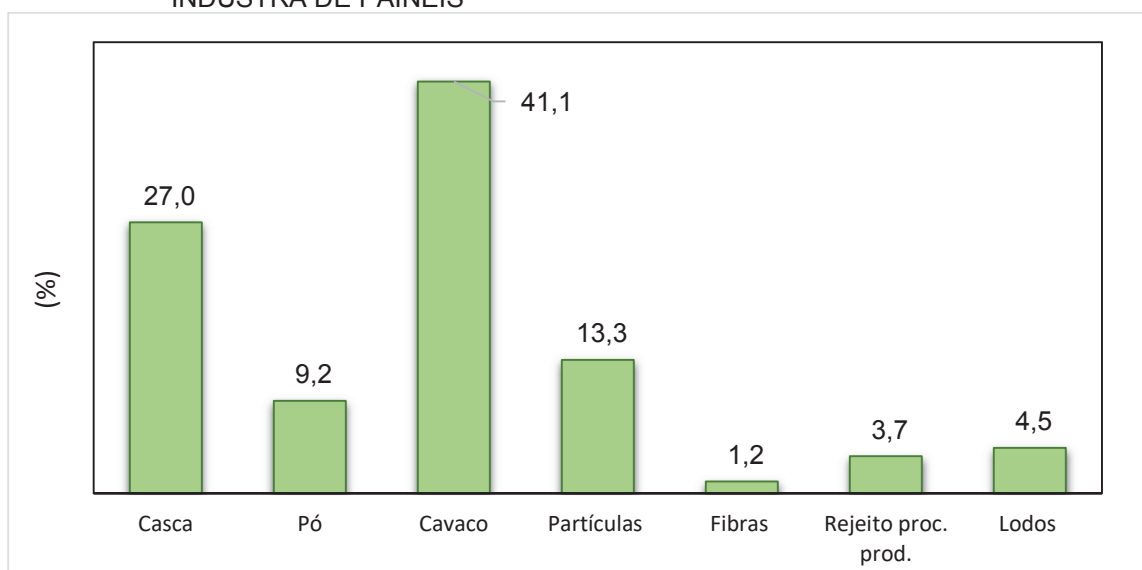
Como pode ser observado, ao formar os grupos há um aumento no total de energia gerada, isso se justifica porque o teor de umidade diminui (FIGURA 22) e consequentemente há um aumento no PCU (FIGURA 32).

Como as indústrias não queima isoladamente cada biomassa residual, a combinação delas pode proporcionar uma melhoria na eficiência energética.

#### 4.6 IMPLICAÇÕES DE ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DE BIOMASSA PARA MELHORIA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA

A partir dos valores de consumo total de biomassa (FIGURA 10), foi determinado o percentual de participação dos grupos no total do consumo, FIGURA 48. A partir desses percentuais, considerados base, foram feitas variações nos mesmos de maneira que um grupo de cada vez e o grupo cavaco apresentassem variação e os demais permanecessem inalterados. A FIGURA 48 apresenta os percentuais de participação de cada grupo no consumo de biomassa.

FIGURA 48 - PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DE CADA BIOMASSA NO CONSUMO ANUAL DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS



Fonte: A autora (2019).

Ao variar um grupo de biomassa em função do grupo cavaco e manter os demais fixos, os valores estimados para as propriedades da biomassa se modificam.

No primeiro cenário o grupo casca apresentou um percentual de participação inicial de 27%, o cavaco de 41% e o somatório dos demais grupos 32%. Foi realizada a variação de 5% para mais e para menos dos grupos casca e cavaco e os demais grupos permaneceram constante em 32%, e avaliadas as variações que essa alteração causou nas propriedades das biomassas. A coluna com os valores base estão em destaque.

A TABELA 11 apresenta os valores estimados das propriedades avaliadas em função da composição proposta: variação casca e cavaco.

TABELA 11 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CASCA/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição - Casca/Cavaco/Outros (%)						
	12/56/32	17/51/32	22/46/32	27/41/32	32/36/32	37/31/32	42/26/32
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4586	4577	4568	<b>4558</b>	4549	4540	4530
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4267	4259	4250	<b>4241</b>	4233	4225	4216
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1849	1827	1804	<b>1785</b>	1760	1738	1716
Energia (GWh)	443,7	438,4	433,1	<b>428,3</b>	422,5	417,2	411,8
DA (kg m <sup>-3</sup> )	383	373	362	<b>353</b>	342	332	322
MV (%)	75,2	74,3	73,5	<b>72,6</b>	71,8	70,9	70,0
CF (%)	21,3	21,7	22,1	<b>22,6</b>	23,0	23,4	23,9
CZ (%)	3,5	3,9	4,4	<b>4,8</b>	5,2	5,7	6,1
TU <sub>bu</sub> (%)	50	50	50	<b>51</b>	51	52	52
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	639,51	639,49	639,47	<b>639,45</b>	639,44	639,42	639,40
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	153,24	153,23	153,23	<b>153,22</b>	153,22	153,22	153,21
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,60	28,60	28,60	<b>28,60</b>	28,60	28,60	28,60
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	684,45	684,44	684,42	<b>684,40</b>	684,38	684,36	684,35
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	345,61	346,68	347,76	<b>348,83</b>	349,91	350,98	352,05
Escória	6,6	6,3	6,1	<b>5,8</b>	5,6	5,3	5,1
Incrustação	1,29	1,28	1,26	<b>1,25</b>	1,24	1,23	1,21
Álcali	1,74	1,77	1,79	<b>1,81</b>	1,84	1,86	1,88
Sinterização	27,1	27,0	26,9	<b>26,8</b>	26,7	26,6	26,5

FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF= carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

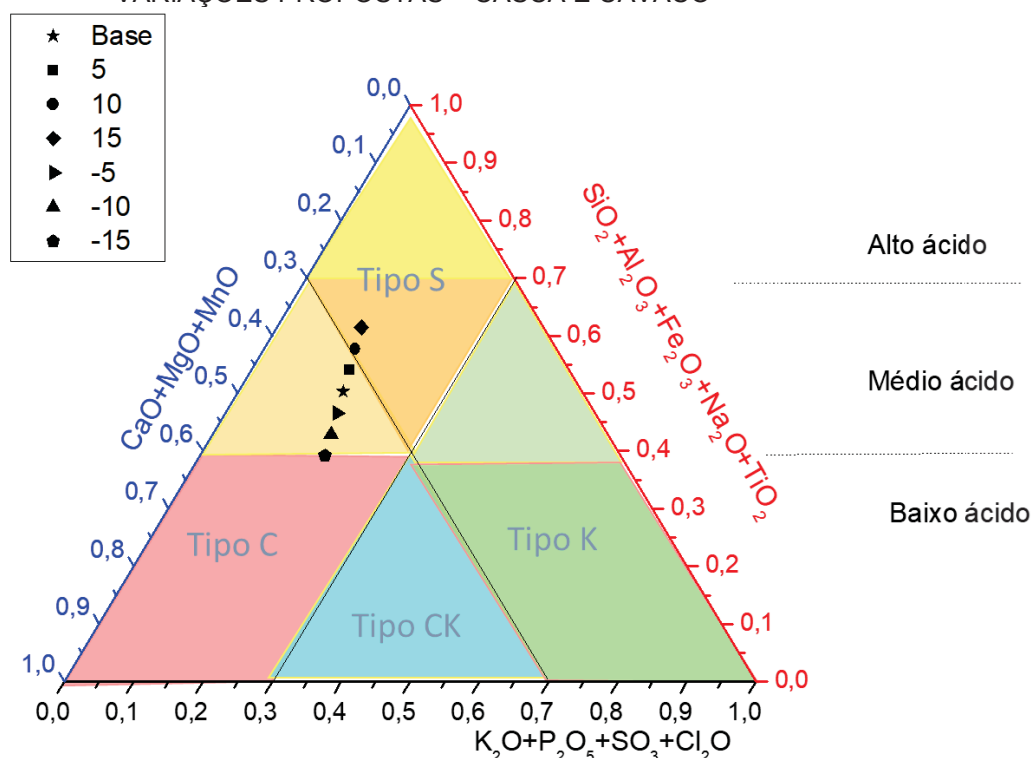
Como pode ser observado na TABELA 11 à medida em que o percentual do grupo casca aumenta, há uma redução no poder calorífico superior, redução na densidade aparente, redução no teor de materiais voláteis. O aumento no teor de cinzas se justifica pela AQI do grupo casca já apresentada na FIGURA 32, onde este grupo apresentou o maior percentual de cinzas. O aumento teor de umidade pode ser justificado pelo fato de que o grupo casca e cavaco apresentaram teores de umidade acima de 50% conforme a FIGURA 22. Os percentuais mais significativos no maior acréscimo de casca foram: aumento de 27% no teor de cinzas, redução de 8,8% na densidade aparente, redução 3,8% na quantidade de energia e redução de 12,6% no índice de escória. Ocorre redução nas emissões de material particulado, NO<sub>x</sub>, CO,



aumento no CO<sub>2</sub>eq e redução na quantidade de energia gerada. Há tendência na formação de escória, incrustação, formação de álcali e não há risco de sinterização.

A FIGURA 49 apresenta a distribuição dos grupos em função do óxido predominante na variação proposta de casca e cavaco.

FIGURA 49 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – CASCA E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Pode-se observar que ao aumentar a quantidade de casca e reduzir a participação do cavaco, ocorre um deslocamento na classificação do óxido predominante, da área Tipo C para a área Tipo S, justificado pelo percentual de SiO<sub>2</sub> no grupo casca, apresentado na TABELA 6, mas mantendo a faixa de temperatura de fusão das cinzas de 1100 a 1300°C.

No segundo cenário, foi realizada a variação do grupo pó e do grupo cavaco para mais e para menos nos percentuais iniciais (9 e 41% respectivamente) mantendo os demais grupos em 50% constante.

A TABELA 12 apresenta os valores estimados das propriedades avaliadas em função da composição proposta: variação pó e cavaco.

TABELA 12 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO PÓ/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição Pó/Cavaco/Outros (%)						
	3/47/50	5/45/50	7/43/50	9/41/50	11/39/50	13/37/50	15/35/50
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4561	4560	4559	4558	4557	4557	4556
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4246	4244	4243	4241	4240	4239	4237
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1657	1699	1741	1785	1824	1866	1907
Energia (GWh)	397,8	47,8	417,8	428,3	437,8	447,8	457,8
DA (kg m <sup>-3</sup> )	351	351	352	353	353	353	354
MV (%)	72,7	72,7	72,7	72,6	72,6	72,6	72,5
CF (%)	22,5	22,5	22,5	22,6	22,6	22,6	22,7
CZ (%)	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
TU <sub>bu</sub> (%)	54	53	52	51	50	49	48
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	638,54	638,84	639,15	639,45	639,76	640,06	640,37
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	153,00	153,08	153,15	153,22	153,30	153,37	153,44
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,56	28,57	28,59	28,60	28,62	28,63	28,64
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	683,42	683,75	684,07	684,40	684,73	685,05	685,38
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	347,30	347,81	348,32	348,83	349,34	349,86	350,37
Escória	7,64	7,56	7,47	7,39	7,31	7,23	7,15
Incrustação	1,87	1,86	1,86	1,86	1,85	1,85	1,84
Álcali	2,64	2,62	2,61	2,60	2,58	2,57	2,56
Sinterização	40,57	40,54	40,52	40,49	40,46	40,44	40,41

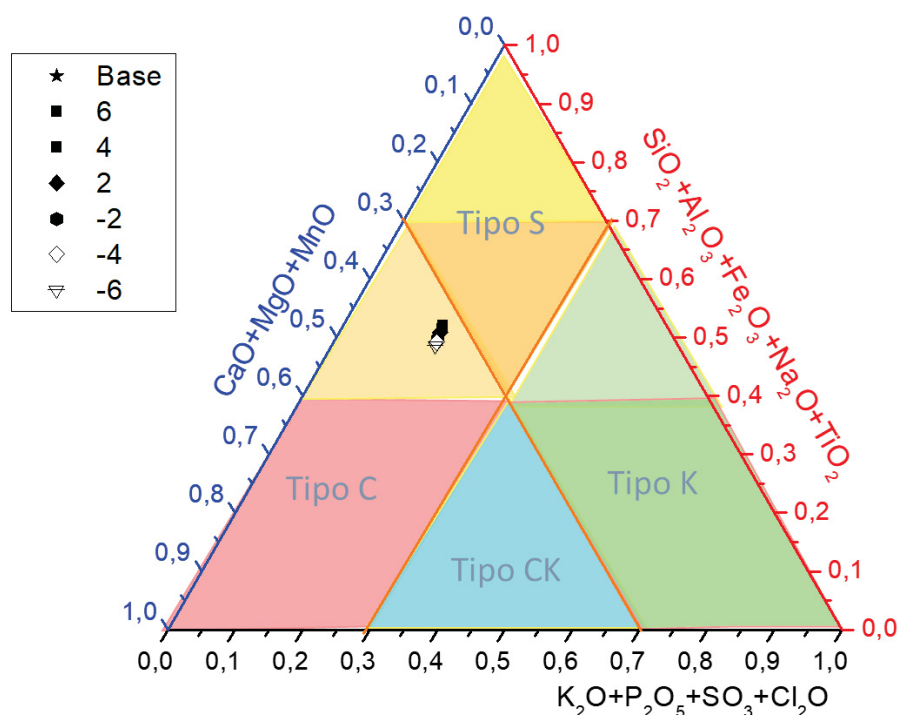
FONTE: A autora (2019).

LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF= carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

De acordo com a TABELA 12 observa-se que com o aumento da participação do pó ocorre aumento na densidade aparente. Pode ser observado ainda que não há variação nos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Ocorre redução no teor de umidade, justificado pelo baixo teor de umidade do grupo pó apresentado na FIGURA 22, um aumento no PCI e conseqüentemente um aumento na quantidade de energia gerada. Há um aumento nas emissões de gases, ocorre a formação de escória, incrustação e álcali e não apresenta risco de sinterização. Os percentuais mais significativos no maior acréscimo de pó foram: 5,9% na redução do teor de umidade, 6,9% no aumento de energia e redução de 3,2% no índice de escória.

A FIGURA 50 apresenta a distribuição da composição proposta em função do óxido predominante na variação pó e cavaco.

FIGURA 50- DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – PÓ E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Ao variar os grupos pó/cavaco, pode-se observar que o aumento do pó provocou um deslocamento, bem menor do que ocorreu com a variação casca/cavaco, justificado pelos teores de CaO em maiores percentuais, conforme a TABELA 6, tendendo ir para a área do Tipo S. Não houve variação na faixa de temperatura de fusão de cinzas, 1100 a 1300°C.

O outro cenário criado foi a variação do grupo partícula e do cavaco, 13 e 41% respectivamente inicialmente, mantendo os demais grupos com 46% de participação. Foram realizadas variações para mais e para menos em relação ao percentual inicial.

A TABELA 13 apresenta os valores estimados das propriedades avaliadas em função da composição proposta: variação partícula e cavaco.

TABELA 13 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO PARTÍCULA/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição Partícula/Cavaco/Outros (%)						
	4/50/46	7/47/46	10/44/46	13/41/46	16/38/46	19/35/46	22/32/46
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4546	4550	4554	4558	4562	4567	4571
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4231	4235	4238	4241	4245	4248	4252
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1866	1839	1812	1785	1758	1731	1704
Energia (GWh)	447,8	414,3	434,8	428,0	422,0	415,5	409,0
DA (kg m <sup>-3</sup> )	345	347	350	353	355	357	360
MV (%)	72,8	72,8	72,7	72,6	72,6	72,5	72,4
CF (%)	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
CZ (%)	4,6	4,7	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0
TU <sub>bu</sub> (%)	49	50	50	51	51	52	53
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	638,22	638,63	639,04	639,45	639,87	640,28	640,69
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	152,93	153,03	153,12	153,22	153,32	153,42	153,52
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,55	28,56	28,58	28,60	28,62	28,64	28,66
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	683,07	683,52	683,96	684,40	684,84	685,28	685,73
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	344,46	345,92	347,37	348,83	350,29	351,75	353,20
Escória	7,74	7,59	7,45	7,30	7,15	7,01	6,86
Incrustação	1,75	1,74	1,73	1,73	1,72	1,71	1,70
Álcali	2,25	2,25	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Sinterização	37,48	37,45	37,42	37,38	37,35	37,31	37,28

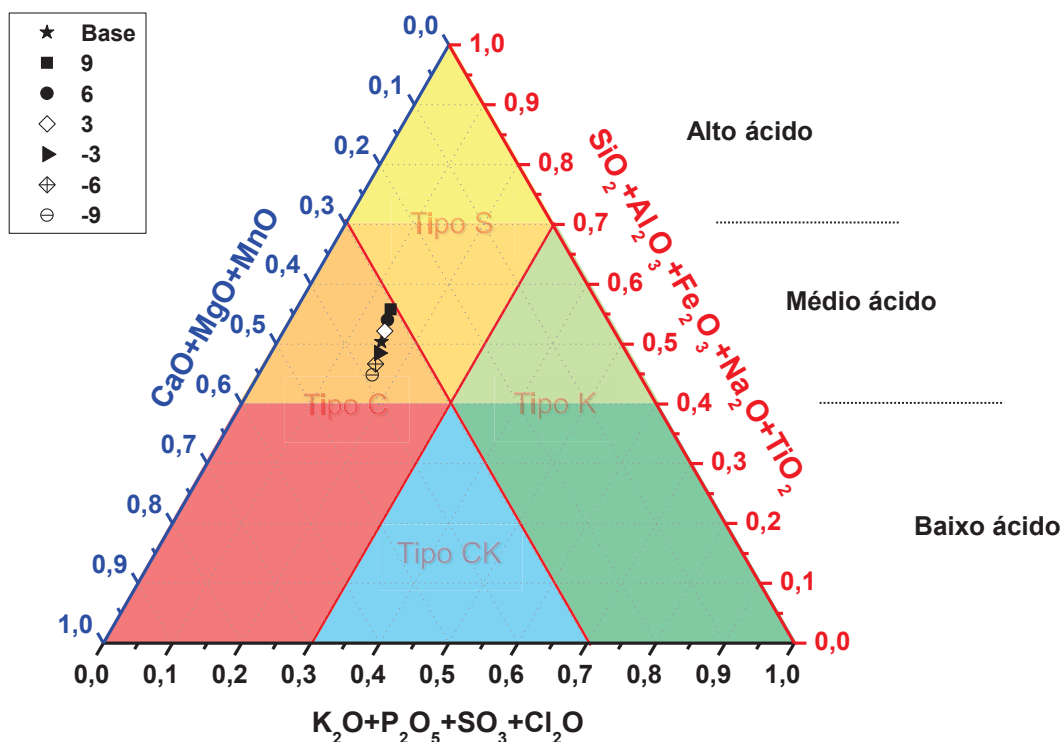
FONTES: A autora (2019).

LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

Na TABELA 13 observa-se que à medida em que aumenta o percentual de partículas, ocorre aumento no teor do PCS e no teor de cinzas. Como ocorre aumento no teor de umidade, em função do teor de umidade do grupo partículas (FIGURA 22) ocorre redução no PCI, na geração de energia. Há um ligeiro aumento nas emissões dos gases. Não apresenta risco de sinterização. Os percentuais mais significativos no maior aumento de partícula foram: aumento na energia de 4,4%, aumento no teor de cinzas 4,2%, aumento do teor de umidade de 3,9%, e redução no índice de escória de 6,0%.

A FIGURA 51 apresenta a distribuição da composição proposta em função do óxido predominante na variação partícula e cavaco.

FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – PARTÍCULA E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Pode ser observado na FIGURA 51 que ao aumentar o percentual de partícula, ocorre um deslocamento da área do Tipo C para a área do Tipo S, em função da característica do grupo partícula apresentada na TABELA 6, não havendo alteração na faixa de temperatura de fusão das cinzas de 1100° a 1300°C.

Outro cenário foi a variação da fibra e do cavaco, sendo que a fibra participava com 1%, o cavaco 41% e os demais com 58%. Nesse cenário não houve redução da participação do grupo fibra, apenas aumento.

A TABELA 14 apresenta os valores estimados das propriedades avaliadas em função da composição proposta: variação fibra e cavaco.

TABELA 14 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FIBRA/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição Fibra/Cavaco/Outros (%)						
	1/41/58	3/39/58	5/37/58	7/35/58	9/33/58	11/31/58	13/29/58
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4558	4556	4555	4553	4551	4550	4548
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4241	4239	4237	4235	4233	4231	4229
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1785	1800	1816	1831	1847	1862	1875
Energia (GWh)	428,3	432,1	435,8	439,5	442,2	446,9	450,5
DA (kg m <sup>-3</sup> )	353	378	374	369	365	361	357
MV (%)	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6
CF (%)	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
CZ (%)	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7
TU <sub>bu</sub> (%)	51	50	50	50	49	49	49
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	639,45	641,68	643,90	646,13	648,35	650,58	652,80
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	153,22	153,76	154,29	154,82	155,36	155,89	156,42
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,60	28,70	28,80	28,90	29,00	29,10	29,20
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	684,40	686,78	689,16	691,54	693,92	696,31	698,69
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	348,83	350,46	352,10	353,73	355,36	356,99	358,63
Escória	7,51	7,45	7,39	7,33	7,27	7,21	7,15
Incrustação	2,05	2,05	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
Álcali	2,91	2,89	2,88	2,87	2,86	2,84	2,83
Sinterização	46,19	46,18	46,17	46,15	46,14	46,13	46,11

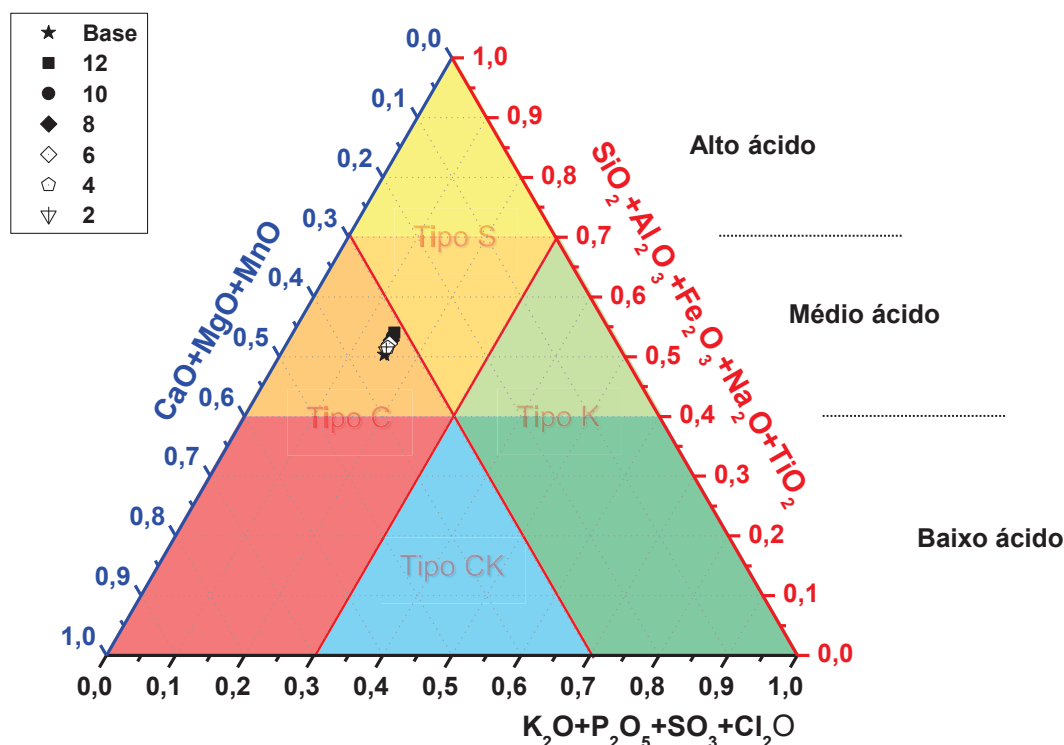
FONTES: A autora (2019).

LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

De acordo com a TABELA 14 observa-se que com o aumento do percentual de fibras ocorre redução do PCS. Pode ser observado que os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas não se alteram. A redução do teor de umidade pode ser justificado pelo fato de que o grupo fibra apresenta menor percentual deste teor conforme FIGURA 22, absorvendo o excesso de umidade dos demais, e conseqüentemente aumento do PCI e da energia produzida. Há aumento nas emissões do gases, propensão a formação de escória, incrustação e álcali e não há risco de sinterização. Os percentuais mais significativos no maior acréscimo de fibra foram: aumento de energia de 5,2%, redução no teor de umidade e cinzas de 3,9% e 2,1%, respectivamente, e redução no índice de escória de 4,8%.

A FIGURA 52 apresenta a distribuição da composição proposta em função do óxido predominante na variação fibra e cavaco.

FIGURA 52 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – FIBRAS E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Pode-se observar que ao aumentar o percentual de fibra, ocorre um deslocamento da área do Tipo C para o Tipo S. A faixa de temperatura de fusão das cinzas não altera, 1100 a 1300°C.

O grupo lodo também não houve redução na participação apenas aumento. Representava 5%, o cavaco 41% e os demais grupos 54%. Os aumentos foram discretos para criar a tendência no comportamento das biomassas.

A TABELA 15 apresenta os valores estimados das propriedades avaliadas em função da composição proposta: variação lodo e cavaco.

TABELA 15 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO LODO/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição Lodo/Cavaco/Outros (%)						
	5/41/54	8/38/54	11/35/54	14/32/54	17/29/54	20/26/54	23/23/54
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4558	4543	4528	4513	4498	4483	4468
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4241	4226	4210	4195	4179	4163	4148
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1785	1747	1709	1671	1633	1595	1557
Energia (GWh)	428,3	419,3	410,2	401,1	391,9	382,8	373,7
DA (kg m <sup>-3</sup> )	353	349	345	341	337	333	329
MV (%)	72,6	71,9	71,2	70,5	69,8	69,1	68,3
CF (%)	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
CZ (%)	4,8	5,5	6,2	6,9	7,6	8,3	9,0
TU <sub>bu</sub> (%)	51	52	52	53	54	54	55
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	639,45	637,61	635,77	633,93	632,09	630,24	628,40
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	153,22	152,78	152,34	151,90	151,46	151,02	150,58
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,60	28,52	28,44	28,35	28,27	28,19	28,11
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	684,40	682,43	680,46	678,49	676,51	674,54	672,57
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	348,83	348,59	348,35	348,11	347,87	347,63	347,39
Escória	7,01	6,94	6,86	6,78	6,71	6,63	6,55
Incrustação	0,62	0,70	0,77	0,85	0,93	1,00	1,08
Álcali	2,29	2,30	2,31	2,32	2,33	2,34	2,35
Sinterização	10,03	12,05	14,06	16,07	18,08	20,09	22,10

FONTE: A autora (2019).

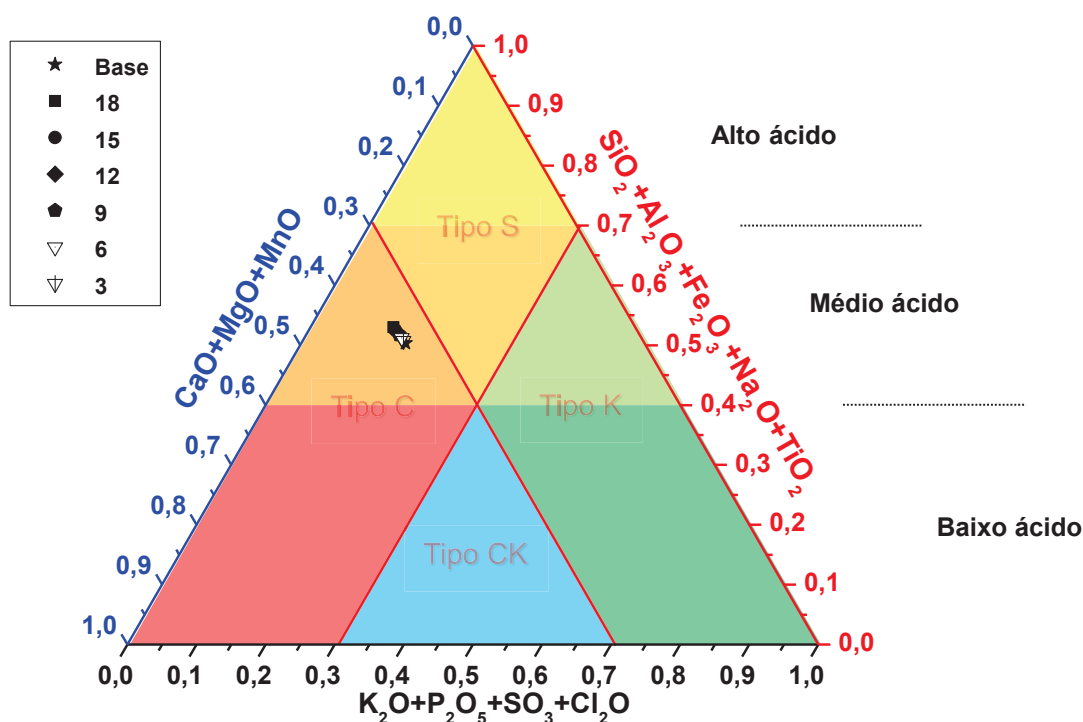
LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF= carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

De acordo com a TABELAS 15 ao aumentar o percentual de lodo, ocorre aumento do teor de umidade, justificado pelos teores de umidade apresentados na FIGURA 22; aumento do teor de cinzas, justificado pela FIGURA 32; diminuição do PCS, do PCI e da geração de energia. Embora não seja um cenário interessante do ponto de vista energético, pois no maior acréscimo apresenta redução na energia de 12,7%, redução na densidade aparente de 6,8%, aumento no teor de cinzas em 87,5%, aumento do teor de umidade em 7,8%, apresenta redução nas emissões de gases em torno de 1,7%. Da mesma forma que os cenários anteriores, apresenta propensão à formação de escória, incrustação e álcali e não apresenta risco de sinterização.



A FIGURA 53 apresenta a distribuição das composições em função do óxido predominante na variação lodo e cavaco.

FIGURA 53 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – LODO E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Pode-se observar na FIGURA 53 que ao variar o percentual de lodo, quase não há deslocamento no Tipo C, justificado pela TABELA 6, onde neste cenário ocorre maiores concentrações de CaO. A temperatura de fusão das cinzas permanece da faixa de 1100 a 1300°C.

No último cenário proposto, houve a variação dos grupos rejeito de processo e cavaco (4 e 41% respectivamente), mantendo os demais grupos com 55%.

A TABELA 16 apresenta as variações nas propriedades em função da variação da composição rejeito de processo e cavaco.

TABELA 16 - PROPRIEDADES DAS BIOMASSAS RESIDUAIS EM FUNÇÃO DA PROPOSTA DE VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO REJEITO DE PROCESSO/CAVACO

Propriedade	Proposta de composição Rejeito de processo/Cavaco/Outros (%)						
	2/43/55	3/42/55	4/41/55	7/38/55	10/35/55	13/32/55	16/29/55
PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	4557	4558	4558	4559	4561	4562	4563
PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	4241	4241	4241	4242	4243	4243	4244
PCU (kcal kg <sup>-1</sup> )	1743	1764	1785	1849	1913	1976	2040
Energia (GWh)	418,2	423,3	428,3	443,7	459,0	474,3	489,6
DA (kg m <sup>-3</sup> )	356	354	353	346	340	334	328
MV (%)	72,5	72,6	72,6	72,6	72,5	72,4	72,4
CF (%)	22,5	22,6	22,6	22,7	22,7	22,8	22,9
CZ (%)	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7
TU <sub>bu</sub> (%)	52	51	51	50	48	47	46
MP (kton ano <sup>-1</sup> )	640,41	639,93	639,45	638,03	636,60	635,18	633,75
NO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	153,45	153,34	153,22	152,88	152,54	152,20	151,86
SO <sub>x</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	28,64	28,62	28,60	28,54	28,47	28,41	28,35
CO (kton ano <sup>-1</sup> )	685,42	684,91	684,40	682,87	681,35	679,82	678,29
CO <sub>2 eq</sub> (kton ano <sup>-1</sup> )	349,11	348,97	348,83	348,41	347,98	347,56	347,13
Escória	6,07	6,07	6,06	6,04	6,03	6,01	5,99
Incrustação	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,94	1,94
Álcali	2,74	2,74	2,73	2,72	2,70	2,69	2,67
Sinterização	44,32	44,31	44,29	44,25	44,21	44,17	44,13

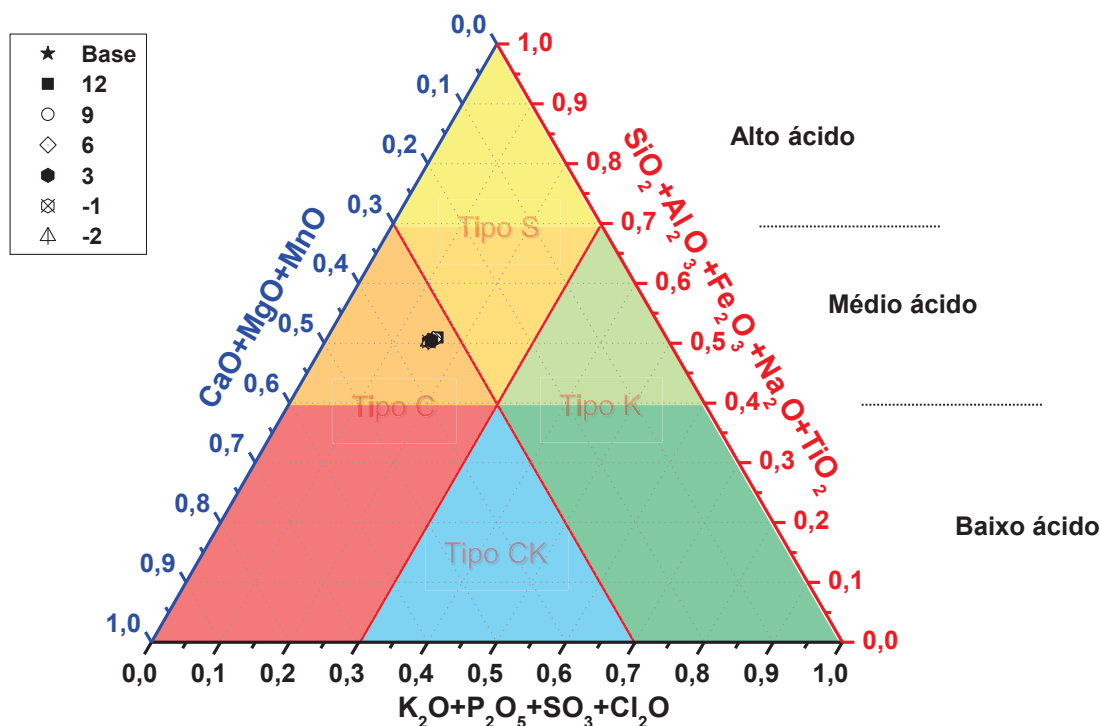
FONTES: A autora (2019).

LEGENDA: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico inferior útil; DA = densidade aparente; MV = materiais voláteis; CF= carbono fixo; CZ = cinzas; TU<sub>bu</sub> = teor de umidade na base úmida; MP = material particulado; NO<sub>x</sub> = óxidos de nitrogênio; SO<sub>x</sub> = óxidos de enxofre; CO = monóxido de carbono; CO<sub>2 eq</sub> = dióxido de carbono equivalente.

Nas variações de rejeito do processo e cavaco, à medida que ocorre aumento no percentual dos rejeitos, ocorre aumento do PCS, diminuição do teor de cinzas, do teor de umidade e aumento do PCU e da geração de energia. Embora no grupo rejeito do processo seja composto por materiais que receberam resina e apresentaram maiores percentuais de nitrogênio conforme apresentado na TABELA 3, essa diferença é absorvida pelos demais grupos, não aumentando as emissões de gases. Os percentuais mais significativos no maior acréscimo de rejeito de processo foram: aumento de energia em 14,3%, redução no teor de umidade em 9,8% e redução da densidade aparente em 7,1%.

A FIGURA 54 apresenta a distribuição das composições em função do óxido predominante na variação rejeito de processo e cavaco.

FIGURA 54 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS EM FUNÇÃO DO ÓXIDO PREDOMINANTE NAS VARIAÇÕES PROPOSTAS – REJEITOS DO PROCESSO E CAVACO



FONTE: A autora (2019).

Como pode ser observado na FIGURA 53 as variações no percentual dos rejeitos do processo praticamente não houve deslocamento no posicionamento do óxido predominante, permanecendo na área do Tipo C e a temperatura de fusão das cinzas na faixa de 1100 e 1300°C.

Como pode ser observado, em todas as composições, o teor de umidade ficou abaixo do limite de 65% estudado por Dai *et al.* (2012), diferentemente do que observado individualmente e nos grupos iniciais, onde as partículas e o lodo ficaram com teores de umidade acima dos 70%.

Pode-se ainda perceber que a redução do teor de umidade, mesmo que em pequenos percentuais melhoram a eficiência energética das biomassas residuais.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

As biomassas residuais do processo produtivo de painéis reconstituídos de madeira podem ser utilizadas para fins energéticos.

O teor de umidade na base úmida das biomassas residuais individuais acima de 30% deve ser reduzido a fim de melhorar o desempenho energético.

As composições propostas de distintas biomassas residuais apresentam teor de umidade abaixo de 65%, valor máximo recomendado pela literatura.

Fibras e pó apresentam capacidades para absorver o excedente de teor de umidade de outros materiais quando misturados.

O resultado da análise da composição das cinzas pode auxiliar na decisão de usar mais ou menos determinada biomassa em função da tendência de formação de escória e incrustação.

Pelo comportamento da biomassa no sistema de classificação química das cinzas (os diversos óxidos minerais presentes), com uso de gráficos ternários, pode-se determinar a temperatura de operação do sistema de combustão.

Considera-se que a determinação dos índices de escória, incrustação e álcalis pode auxiliar na previsão da manutenção do conjunto de equipamento de combustão, assim como determinar o material a ser utilizado na confecção do referido conjunto.

Implicações de alterações na composição de biomassa podem melhorar a produção de energia.

Dentre as composições de biomassa propostas, as alterações que fornecem mais energia são o aumento nos grupos rejeito de processo, pó e fibra.

## 6 REFERÊNCIAS

ARBEX, M.A.; CANÇADO, J.E.D.; PEREIRA, L.A.A.; BRAGA, A.L.F.; SALDIVA, P.H.N. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, n. 30, vol.2, p.158-175, Mar-Abr, 2004. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-37132004000200015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-37132004000200015) Acesso em:22/04/2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 14984/2003** – Madeira: determinação da densidade aparente de cavacos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 14929/2017** – Madeira – determinação do teor de umidade dos cavacos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico ABRAF – 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. Disponível em: <https://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf> Acesso em: 03/02/2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM – D1762-84** - Standard Test Method for Chemical Analysis of wood charcoal. Disponível em: <https://compass-astm.ez22.periodicos.capes.gov.br/CUSTOMERS/search/search.html?query=D1762&dctype=all&quicksearch=true.htm> Acesso em: 10/02/2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM – D5865-13** - Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. Disponível em: <https://compass-astm.ez22.periodicos.capes.gov.br/CUSTOMERS/search/search.html?query=D5865-13%20&dctype=all&quicksearch=true> Acesso em: 10/02/2016

ARAÚJO, A.C.C.; COSTA, L.J.; BRAGA, P.P.C.; GUIMARÃES NETO, R.M.; ROCHA, M.F.V.; TRUGILHO, P.F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.16, jul, 2018. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1546> Acesso em: 06/03/2016

BATISTA, J.S. Etapas do processo produtivo da empresa Berneck S.A. painéis e serrados. **Trabalho de conclusão de curso**. Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Catarina. Curitibanos, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/121890> Acesso em: 06/03/2016

BILANDZIJA, N.; VOCA, N.; JELCIC, B.; JURISIC, V.; MATIN, A.; GRUBOR, M.; KRICKA, T. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 93, p. 225-30, out, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118303848> Acesso em: 15/04/2017

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I.B.; QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. Influence of storage time on the quality of biomass for energy production in humid subtropical regions. **Cerne**, v. 16, n. 4, Lavras, Out/Nov, 2010. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602010000400012](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602010000400012)  
Acesso em: 26/07/2017

BRIANEZI, D.; JACOVINE, L.A.G.; SOARES, C.P.B.; GONÇALVES, W.; ROCHA, S.J.S.S. Balanço de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa no Campus da Universidade Federal de Viçosa. **Revista Floresta e Ambiente**, 2014. Disponível em :

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-80872014005000015&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2179-80872014005000015&script=sci_abstract&tlng=pt) Acesso em: 13/12/2017

BRYERS, R.W. Fireside slagging, fouling, and high-temperatura corrosion of heat-transfer surfasse due to impurities in steam-raising fuels. **Progress in energy and combustion science**, v. 22, n. 1, p. 29-120, 1996. Disponível em: Acesso em: 13/12/2017

CÂMARA DE COMÉRCIO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em:

[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_adf.ctrl-state=ug6s9c0s5\\_5&\\_afLoop=305234179336106#!](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=ug6s9c0s5_5&_afLoop=305234179336106#!) Acesso em: 11/03/2019

CARVALHO, R.M.M.A., SOARES, T.S., VALDERDE, S.R. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, v15. n.1, p. 105-118, 2005. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982005000100105&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982005000100105&script=sci_abstract&tlng=pt) Acesso em: 14/02/2016

CHINNICI, G.; D'AMICO, M.; RIZZO, M.; PECORINO, B. Analysis of biomass availability for energy use in Sicily. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1025-1030, dez, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115008217> Acesso em: 08/04/2018

COELHO, A.C.M.Q.; ANTONIOLI, L.; DINO, R.; PORTELA, H.A. Avaliação do potencial gerador de petróleo da seção Aptiana-Albiana da Bacia de Sergipe, integrando análises palinofaciológicas e dados de geoquímica orgânica. **Brazilian Journal of Geology**, v.44, n4, p.579-595, Dez, 2014. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2317-48892014000300579&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2317-48892014000300579&script=sci_abstract&tlng=pt) Acesso em:13/09/2017

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Plano de redução de emissões de fontes estacionárias. Guia de melhor tecnologia prática disponível - fontes de combustão**. São Paulo, 2015. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2015/12/Guia-MTPD-Fontes-de-Combust%C3%A3o.pdf> Acesso em: 16/02/2016

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. L.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**.

Campinas, SP: Editora Unicamp, 2 ed., 2011. Disponível em:

<https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>  
Acesso em: 16/02/2016

DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J.R. Biomass feeding for thermochemical reactors. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, p. 716-736, 2012. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/progress-in-energy-and-combustion-science>  
Acesso em: 03/02/2017

DELUCIS, R.A.; SANTOS, P.S.B.; BELTRAME, R.; GATTO, D.A. Chemical and fuel properties of forestry wastes from pine plantations. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, Viçosa, Maio, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622017000500207&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622017000500207&script=sci_arttext) Acesso em: 05/12/2018

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.30, p. 219–230, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128503000789> Acesso em: 15/06/2017

DOMANSKI, P.D.; LEPPAKOSKI, J.; DURANDO, E.P.; ONOFRE, R.C. **Melhoria de eficiência na queima de bagaço em caldeira de grelha**. Em: <https://docplayer.com.br/12482308-Melhoria-de-eficiencia-na-queima-de-bagaco-em-caldeira-de-grelha.html>. Acesso em 05/08/2015.

Eastern Research Group Inc. "Emission inventory improvement Program Volume II: chapter 2, Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emissions from Boilers." North Carolina, **EPA**, 2001. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/ii02.pdf> Acesso em: 12/11/2015

Environmental Product Declaration, **American Wood Council and Canadian Wood Council**, Nov, 2013. Disponível em: <https://www.awc.org/pdf/greenbuilding/epd/AWC-EPD-Particleboard-1311.pdf>  
Acesso em: 12/11/2015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018> Acesso em: 21/10/2018

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA:  
<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica> - Acesso em 20/12/2018.

FERNANDES, P.I.C. **Estudo da biomassa florestal residual consumida em centrais termoelétricas**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, p.76, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/18448>  
Acesso em: 25/10/2017

FERNANDEZ, M.J.; BARRO, R.; PEREZ, J.; LOSADA, J.; CIRIA, P. Influence of the agricultural management practices on the yield and quality of poplar biomass (a 9-

year study). **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 87-96, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341630229X> Acesso em: 24/03/2018

FURTADO, T.S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; NEVES, M.D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, n.3, vol. 36, Viçosa, Mai/Jun, 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622012000300020&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622012000300020&script=sci_abstract&tlng=pt) Acesso em: 12/04/2018

FOURNEL, S.; PALACIOS, J.H.; MORISSETTE, R.; VILLENEUVE, J.; GODBOUT, S.; HEITZ, M.; SAVOIE, P. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**, v.141, p. 247–259, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914012719> Acesso em: 12/04/2018

GIRONÈS, V.C.; MORET, S.; PEDUZZI, E.; NASATO, M.; MARÉCH, F. Optimal use of biomass in large-scale energy systems: insights for energy policy. **Energy**, v.137, p.789 – 797, out., 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217307831> Acesso em: 15/05/2018

GLAZOFF, M.V. Process Safety Review: Molten Salt Pyrolysis of Oil Residue for Energy Industry. **A Computational Thermodynamics Perspective**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/264977913\\_Process\\_Safety\\_Review\\_Molten\\_Salt\\_Pyrolysis\\_of\\_Oil\\_Residue\\_for\\_Energy\\_Industry\\_A\\_Computational\\_Thermodynamics\\_Perspective](https://www.researchgate.net/publication/264977913_Process_Safety_Review_Molten_Salt_Pyrolysis_of_Oil_Residue_for_Energy_Industry_A_Computational_Thermodynamics_Perspective). Acesso em 13/11/2018.

GRANADA, E.; GONZALEZ, L.M.L.; MÍGUEZ, J.L.; MORAN, J. Fuel lignocellulosic briquetes, die design and products study. **Renewable Energy**, v. 27, p. 561 – 573, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148102000058> Acesso em:04/08/2017

GOMES, J.A.F.L.; AZARUJA, B.A.; MOURÃO, P.A.M.; From MDF and PB wastes to adsorbents for the removal of pollutants. **Applied surface science**, v. 380, p. 119-126, set, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433216301982> Acesso em:04/08/2017

GONZÁLEZ-GARCIA, S.; FEIJOO, G.; HEATHCOTE, C.; KANDELBAUER, A.; MOREIRA, M.T. Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system. **Journal of Cleaner Production**, n.19, p. 445-453, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610004348> Acesso em: 06/07/2018

GUERRA, J.B.S. O.A.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; ANDRADE, S. F. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and



mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 197-210, 2015.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261401021X> Acesso em: 09/05/2017

HERNANDEZ, J.J.; LAPUERTA, M.; MONEDERO, E.; PAZO, A. Biomass quality control in power plants: Technical and economical implications. **Renewable Energy**, v. 115, p. 908-916, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117308881> Acesso em: 05/01/2019

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ), 2017. Disponível em :

<https://iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/iba-relatorioanual2017.pdf> Acesso em: 01/04/2019

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. Curitiba. Fupef, 254 p, 2005.

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

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382097000593> Acesso em: 05/03/2016

KALISZ, S; PRNOBIS, M.; BAXTER, D. Co-firing of biomass waste derived syngas in coal power boiler. **Energy**, 33, p.1770–1778, 2008. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544208001886> Acesso em: 13/10/2016

LIU, B.; HE, Q.; JIANG, Z.; XU, R.; HU, B. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. **Fuel**, n. 105, p. 293-300, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112004668> Acesso em: 28/11/2017

LIVINGSTON, B.; BABCOCK, M. Ash related issues in biomass combustion.

**ThermalNet workshop**, Set, Glasgow, Escócia, 2006.

LORA, E.E.S.; SALOMON, K.R. Análise comparativa da utilização da biomassa com tecnologias convencionais de geração aplicando a eficiência ecológica. Encontro de Energia no Meio Rural – **Anais 5**, 2004. Disponível em:

[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022004000100009&lng=pt&nrm=iso](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000100009&lng=pt&nrm=iso) Acesso em: 30/11/2017

LUNDGREN, J.; HERMANSSON, R.; DAHL, J. Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems. **Biomass & Bioenergy**, n. 26, p. 443-453, 2004. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953403001624> Acesso em: 19/04/2016

MARTINS, C.A.; FERREIRA, M.A. **Considerações sobre a formação de NOx na combustão**. Vi Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 18 a 21 de agosto de

2010, Campina Grande. Paraíba, Brasil. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2011/01.18.14.54/doc/considera%e7%f5es.pdf> Acesso em: 06/10/2017

MATTOS, R.L.G.; GONÇALVES, R.M.; CHAGAS, F.B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008. Disponível em: [https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf](https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf) Acesso em: 02/03/2016

MATTSSON, J.E.; KOFMAN, P.D. Influence of particle size and moisture content on tendency to bridge in biofuels made from willow shoots. **Biomass and Bioenergy**, v.24, p. 429-435, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953402001782> Acesso em: 02/03/2016

MAYER, F.M., TEIXEIRA, C.M.; PACHECO, J.G. A.; SOUZA, C.T.; BAUER, D.V.; CARAMÃO, E.B.; ESPÍNDOLA, J.S.; TRIERWEILER, J.O.; LOPEZ, W.P.; ZIN, C.A. Characterization of analytical fast pyrolysis vapors of medium-density fiberboard (mdf) using metal-modified HZSM-5. **Journal of analytical and applied pyrolysis**. doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237018307290> Acesso em: 10/03/2019

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology** – 83, p. 37 – 46, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183> Acesso em: 14/02/2016

MUDGAL, D.; SINGH, S.; PRAKASH, S. Corrosion Problems in Incinerators and Biomass-Fuel-Fired Boilers. **International Journal of Corrosion**, 14 pages, 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/505306> . Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijc/2014/505306/> Acesso em: 19/05/2017

NIU, Y.; TAN, H.; WANG, X.; LIU, Z.; LIU, H.; XU, T. Study on fusion characteristics of biomass ash. **Bioresource Technology**, v.101, n.23, p.9373-9381, dez, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410011491> Acesso em: 19/05/2017

NUNES, L.J.R.; MATIAS, J.C.O.; CATALÃO, J.P.S. Biomass in the generation of electricity in Portugal: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.71, p.373-378, Mai, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116311212> Acesso em: 06/07/2018

OLABI, A.G. Circular economy and renewable energy. **Energy**, doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.196 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219310849?via%3Di> hub Acesso em: 11/12/2018

OLIVEIRA, L.H.; BARBOSA, P.V.G.; LIMA, P.A.F.; YAMAJI, F.M.; SETTE JUNIOR, C.R. Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, n.3, set, 2017. Disponível em:

[http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0871-018X2017000300020](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2017000300020) Acesso em: 26/04/2018

OZYUGURAN, A.; YAMAN, S. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. **Energy procedia**, v. 107, p.130-136, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216317386> Acesso em: 26/04/2018

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC), CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion: beyond 2020, **International Energy Agency**, Documentation, 68 p., 2009. Disponível em:

[http://wds.iea.org/wds/pdf/Worldco2\\_Documentation.pdf](http://wds.iea.org/wds/pdf/Worldco2_Documentation.pdf) Acesso em: 10/02/2016

PALACKA, M.; VICIAN, P.; HOLUBCIK, M. JANDACKA, J. The energy characteristics of different parts of the tree. **Procedia Engineering**, v. 192, p. 654-658, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817326590> Acesso em: 26/11/2018

PELANDA, K.A.; POTULSKI, D.C.; SILMA, D.A., FERRAZ, F.A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)** 6(2), p. 112-121, 2015. Disponível em:

<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/5457> Acesso em: 05/04/2016

PETROLEUM GEOSCIENCE TECHNOLOGY (PGT) – GEOLOGIA DO PETRÓLEO. Disponível em:

[https://albertowj.files.wordpress.com/2010/03/geologia\\_do\\_petroleo.pdf](https://albertowj.files.wordpress.com/2010/03/geologia_do_petroleo.pdf) - Acesso em 28/12/018.

PIEKARSKI, C.M.; FRANCISCO, A.C.; DA LUZ, L.M.; ALVARENGA, T.H.P.; BITTENCOURT, J.V.M. Environmental profile analysis of mdf panels production: study in a brazilian technological condition. **Revista Cerne**, v.20, nº 3, p.409-418, 2014. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602014000300010](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602014000300010) Acesso em:16/07/2017

PRNOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. **Biomass Bioenergy**, n.28, v. 4, p.375–383, 2005. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195340400193X> Acesso em:03/08/2017

PRNOBIS, M. The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency. **Fuel**, 85, p.474–80, 2006. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236105002772> Acesso em: 18/09/2016

PROTÁSIO, T.P.; ALVES, I.C.N.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; BALIZA, A.E.R. Compactação da biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.68, p. 273-283, out/dez, 2011. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/288> Acesso em: 18/09/2016

REIS, A.A.; PROTÁSIO, T.P.; MELO, I.C.N.A.; TRUGILHO, P.F.; CARNEIRO, A.C.O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 71, v. 32, p.277-290, jul/set,2012. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/363> Acesso em: 22/08/2018

RIVELA, B.; HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Life cycle inventory of particleboard: a case study in the wood sector. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, March 2006, n. 2, v. 11, pp 106–113. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2005.05.206> Acesso em: 06/08/2018

QUÉNO, L. M. R.; SOUZA, A. N.; ÂNGELO, H.; VALE, A.T.; MARTINS, I. S. Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim-elefante para energia. **CERNE**, vol. 17, núm. 3, p. 417-426, jul-set, 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602011000300017&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602011000300017&script=sci_abstract&tlng=pt) Acesso em: 06/08/2018

RUSHDI, A.; SHARMA, A.; GRUPTA, R. an experimental study of the effect of coal blending on ash deposition. **FUEL**, v. 83, p. 495-506, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236103002965> Acesso em: 14/06/2017

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.15, p. 2262–2289, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000578> Acesso em: 15/06/2018

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais**. Produção Independente, Viçosa. 1ª ed., 551 p, 2013.

SARACHE, H.A.M. **Avaliação físico-química das cinzas dos resíduos da cultura da mandioca durante a formação de aglomerações com material inerte**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, p.132, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265890> Acesso em: 18/03/018

SILVA, D. A. L. Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil. **Dissertação**. Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos, 2012. Disponível em: [www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../DiogoAparecidoLopesSilvaMECorrigida.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../DiogoAparecidoLopesSilvaMECorrigida.pdf) Acesso em: 16/04/2018

SILVA, C.J. **Densidade básica e potencial energético de espécies lenhosas do cerrado do estado de Tocantins**. Tese de doutorado do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, dezembro, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/17934> Acesso em: 16/04/2018

SCHIRMER, W.N.; FERREIRA, I.T.M.; RIBEIRO, C.B.; PAVANELLO, G.P.; MACHADO, G.O.; RODRIGUES, P.R.P. Caracterização de biomassa residual de fábrica de papel-cartão para aproveitamento energético. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.10, n.4, p.1113-1132, 2017. Disponível em: <http://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/4839> Acesso em: 26/11/2018

SCREMIN, A. L. T. Estudo Energético e Fisicoquímico do Carvão Vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Dissertação de mestrado**. Pós-Graduação em Bioenergia. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, 2012. Disponível em: [https://www.unicentro.br/posgraduacao/mestrado/bioenergia/dissertacoes/Disserta\\_o\\_Andr\\_Luis\\_Trentin\\_Scremin\\_final\\_5143650b3a317.pdf](https://www.unicentro.br/posgraduacao/mestrado/bioenergia/dissertacoes/Disserta_o_Andr_Luis_Trentin_Scremin_final_5143650b3a317.pdf) Acesso em: 26/11/2018

TONINI, H; SCWENGBER, D.R.; MORALES, M.M.; MAGALHÃES, C.A.S.; OLIVEIRA, J.M.F. Growth, biomass, and energy quality of Acacia mangium timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.7, p.791-799, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2018000700791](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2018000700791) Acesso em: 02/12/2018

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of air pollutant emission factors (AP-42) Volume 1, Fifth Edition**, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1995. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors> Acesso em: 06/03/2016

VALE, A.T.; MENDES, R.M.; AMORIM, M.R.S.; DANTES, V.F.S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Revista Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, abr/jun. 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602011000200015&script=sci\\_abstract&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602011000200015&script=sci_abstract&lng=pt) Acesso em: 08/10/2017

VARGAS-MORENO, J.M.; CALLEJÓN-FERRE, A.J.; PÉREZ-ALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**,

v.16, p. 3065– 3083, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112001487> Acesso em: 14/11/2017

VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C.G.; MORGAN, T.J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. **Fuel**, n. 96, p. 1-33, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236111005904> Acesso em: 16/12/2017

VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C.G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. **Fuel**, n.117, p. 152-183, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113008533> Acesso em: 16/12/2017

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 261-314, 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523> Acesso em: 05/07/2016

VIDAL, A.C.F.; HORA, A.B. Panorama de mercado: - painéis de madeira. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 40, p. 323-384, 2014. Disponível em:

<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3023/1/Panorama%20de%20mercado.pdf> Acesso em: 05/07/2016

VIEIRA, A.C.; SOUZA, S.N.M.; BARICCATTI, R.A.; SIQUEIRA, J.A.C.; NOGUEIRA, C.E.C. Caracterização da casca de arroz para geração de energia. **Revista varia scientia agrárias**, v. 03, n.01, p. 51-57, 2013. Disponível em: <http://e-revista.unioeste.br/index.php/variascientiaagraria/article/view/6100> Acesso em:

12/08/2017

VIS, M; MANTAU, U; ALLEN, B. Study on the optimised cascading use of wood. **Final report**, Bruxelas, p. 337, 2016. Disponível em:

[https://ec.europa.eu/growth/content/study-optimised-cascading-use-wood-0\\_en](https://ec.europa.eu/growth/content/study-optimised-cascading-use-wood-0_en) Acesso em: 12/08/2017

XING, P.; MASON, P.E.; CHILTON, S.; LLOYD, S.; JONES, J.M.; WILLIAMS. A.; POURKASHANIAN, M. A comparative assessment of biomass ash preparation methods using X-ray fluorescence and wet chemical analysis. **Fuel**, n.182, p. 162-165, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116303969> Acesso em: 15/04/2018

YADAV, I.C.; DEVI, N.L. Biomass burning, regional air quality, and climate change. **Reference module in Earth systems and environmental sciences**, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11022-X> Acesso em: 05/01/2019

WBSCD, “The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard - Edição revisada. Washington, **WRI/WBCSD**, 2015. Disponível:

<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> Acesso em: 06/03/2016

WILSON, J. B. Life-cycle inventory of Medium Density Fiberboard in terms of resources, emissions, energy and carbono. **Wood and Fiber Science**, 42(CORRIM Special Issue), 2010, pp. 107–124. Disponível em: [wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/706](http://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/706) Acesso em: 13/09/2017

WOLF, J.P.D. Biomass combustion for power generation: an introduction. **Energy Power**, Woodhead Publishing Limited, 2013. DOI: 10.1533/9780857097439.1.3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857091314500017> Acesso em: 13/09/2017